

# ***Fotografía y conocimiento***

***La imagen científica en la era electrónica***

**(Desde los inicios hasta 1975)**



**José Cuevas**

**Noviembre, 2009**

# ***Fotografía y conocimiento***

***La imagen científica en la era electrónica***

**(Desde los inicios hasta 1975)**

***por***

**José Cuevas**

Dedicado a mis padres.

#### Agradecimientos:

A las siguientes instituciones pertenecientes al Consejo Superior de Investigaciones Científicas: Real Academia de Ciencias exactas, físicas y naturales, Instituto de Química- Física Rocasolano, particularmente a Julia Sauza Aparicio, Juan Antonio Hermoso y Félix Hernández Cano del Departamento de Cristalografía y Biología Molecular (Estructura de proteínas, Cristalografía de rayos X. Resonancia Magnética.); a José F. Marco y Ramón Gancedo del Departamento de Espectroscopía de Superficies; a Angel Cuesta del Departamento de Química – Física de Interfases y Electroquímica, Grupo de Electroquímica. (Espectroscopía de Efecto Túnel); a Marta Bruix del Departamento de Resonancia Magnética Nuclear; Rosa Lebrón del Servicio de Cromatografía y Espectrometría de masas; Centro de Física Miguel A. Catalán. Sección de Óptica y Estructura de la Materia, particularmente a Rodolfo Hernández del Dpto. de Láser y Holografía; Rafael Navarro del Dpto. de Fotografía de Alta Velocidad; Rosalía Serna del Dpto. Procesos Ópticos en medios confinados; Gabriel Cristóbal del Dpto. de Imagen y Visión; Centro de Tecnologías Físicas. Leonardo Torres Quevedo; a Fernando Pinto del Instituto de Ciencias Medio Ambientales. Departamento de Microscopía Electrónica; a Rogelio Sánchez Verdasco del Museo de Ciencias Naturales; Centro de Humanidades. Instituto de Filosofía e Instituto de Historia; Anabel Marina del Laboratorio de Proteómica. Centro de Biología Molecular Severo Ochoa. Mención especial debo hacer del Grupo de Óptica de Metales de este Consejo, y más en particular de la figura de José Antonio Aznárez, en la actualidad miembro del Dpto. de Tecnologías de gases y superficies, activo experimentador durante décadas en el Laboratorio de Microscopía Electrónica del Instituto de Óptica antes reseñado.

También debo agradecer a Narciso García del Grupo de Tratamiento de Imágenes de la Escuela Superior de Ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad Politécnica de Madrid; y a Ricardo Corripio, de la empresa Aries. Ingeniería y sistemas, por la ayuda prestada.

En el ámbito personal he contado con el asesoramiento y comentarios de Pablo Sorozábal, filósofo, músico y literato; Javier de Cambra, filósofo y crítico musical; Manuel Sierra, profesor de Matemáticas; Fernando Abalos, Ingeniero de Telecomunicaciones y especialista en fotografía astronómica; Alfonso Calvo, fotógrafo y sociólogo; Jaime Barroso, cineasta; Javier López, biólogo; Antonio Avia, documentalista; y con la ayuda de todos aquellos que me apoyaron de una forma u otra con su solidaridad, amistad y cariño, en especial Josefa Palau, María José Fernández y, cómo no, a Marieta y Alicia.

# INDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1. Maneras de ver el mundo.....	3
1.2. Historia y filosofía de la ciencia fotográfica.....	5
1.3. Imagen e imaginación.....	7
1.4. 1927: el conocimiento en la encrucijada.....	9
1.5. La imagen técnica en construcción.....	9
1.6. Dos siglos decisivos: 1777- 1975.....	12
 <b>CAPÍTULO 2: FOTOGRAFÍA Y ELECTRICIDAD. UNA MIRADA RETROSPECTIVA</b>	 <b>17</b>
2.1. El ámbar y la sombra: Tales de Mileto.....	17
2.1.1. El cero y el vacío.....	23
2.1.2. Uno basta para sacar todo de nada.....	25
2.1.3. El horror al vacío.....	29
2.2. La electricidad en busca de imágenes.....	32
2.3. Fotografía y electricidad en las artes gráficas.....	41
2.3.1. La litografía.....	44
2.3.2. La irrupción de la fotografía en las artes gráficas....	47
2.3.3. La electricidad en las artes gráficas.....	50
2.3.4. La impresión por medios tonos. El huecograbado tramado..	53
2.3.5. La artes gráficas en los umbrales del siglo XX.....	58
2.4. De la electrografía a la electrofotografía.....	62
2.4.1. El universo electrográfico.....	64
2.4.2. De la electrofotografía a la reprografía.....	76
2.4.3. Primeras transmisiones de imágenes a distancia por medios eléctricos.....	79
2.5. La electricidad en la fotografía: obturadores, fotometría e iluminación artificial.....	85
2.5.1. Los obturadores.....	86
2.5.2. La fotometría.....	90
2.5.3. La luz eléctrica en la fotografía.....	97
 <b>CAPÍTULO 3. LA FOTOGRAFÍA EN LA FORMACIÓN DE LA CIENCIA ELECTRÓNICA. 1850- 1920</b>	 <b>109</b>
3.1. La fotografía y el fin del determinismo en ciencia.....	109
3.2. Las primeras imágenes electrónicas.....	115
3.3. La fotografía en la configuración del universo atómico.....	122
3.4. El descubrimiento de la radioactividad.....	124
3.5. La cámara de niebla.....	126
3.6. La difracción de rayos X.....	130
3.7. Los rayos cósmicos.....	132
3.8. El espectrógrafo de masas.....	135
3.9. La fotografía en la revolución cuántica y relativista.....	137
3.10. La espectroscopía óptica.....	138



<b>CAPÍTULO 4. LA FOTOGRAFÍA EN LA CREACIÓN DE LA IMAGEN ELECTRÓNICA. 1900- 1960</b>	<b>151</b>
4.1. Electrones a distancia. El nacimiento de la tecnología radio...	151
4.2. La fotoelectricidad.....	156
4.3. Los fototubos y las células fotoeléctricas por emisión....	160
4.4. Fototubos de vacío, y de gas.....	161
4.5. El fototubo multiplicador.....	163
4.6. El tubo de imagen o iconoscopio.....	164
4.7. Las células fotoconductoras.....	166.
4.8. Las células fotovoltaicas.....	168
4.9. El osciloscopio.....	169
4.10. Electrones en perspectiva: del iconoscopio a la televisión....	175
4.11. La Optica electrónica.....	185
4.12. El microscopio electrónico.....	188
4.13. Los aceleradores de partículas y el universo atómico.....	195
 <b>CAPÍTULO 5. LA FOTOGRAFÍA Y LA IMAGEN ELECTRÓNICA: LA INSTRUMENTACIÓN. 1900- 1970</b>	 <b>213</b>
5.1. Hacia una nueva concepción del fenómeno fotográfico.....	214
5.1.1. Teoría y experiencias de la fotografía de sales de plata...	215
5.1.2. Nuevos mundos, nuevas imágenes.....	220
5.2. La fotometría por medios electrónicos.....	222
5.3. Más allá de la plata: otros sistemas de producción de imágenes...	231
5.3.1. La fotopolimerización.....	234
5.3.2. La diazotipia.....	235
5.3.3. Fotografía de radicales libres.....	236
5.3.4. El fotocromismo.....	237
5.3.5. Procedimientos electrofotográficos y electrográficos.....	238
5.3.6. La termografía.....	240
5.3.7. La electroforesis y la cromatografía.....	242
5.4. La conquista del espectro.....	247
5.4.1. La fotografía ultravioleta y de fluorescencia.....	250
5.4.2. La fotografía de infrarrojos y la termografía.....	252
5.4.3. El láser.....	256
5.4.4. La holografía.....	257
5.5. Hacia una nueva espectrografía.....	260
5.5.1. La espectrografía en la era electrónica.....	264
5.5.2. La imagen en la nueva espectroscopía.....	269
 <b>CAPÍTULO 6. LA FOTOGRAFÍA Y LA IMAGEN ELECTRÓNICA: APLICACIONES CONJUNTAS. 1900- 1970</b>	 <b>277</b>
6.1. <b>La imagen de lo lejano</b> .....	279
6.1.1. El eco y la sombra. Del radar a las estrellas de la radio...	284
6.1.2. La radioastronomía.....	285
6.1.3. Ondas de luz, ondas de radio.....	286
6.1.4. Astros, estrellas y planetas.....	288
6.1.5. El radar.....	290
6.1.6. Galaxias, nebulosas, novas y supernovas.....	292
6.1.7. Púlsares y agujeros negros.....	295

6.1.8.	Quasi- estrellas y Big Bang.....	297
6.1.9.	La fotografía en la conquista del espacio.....	299
6.1.9.1.	Globos en el cielo.....	299
6.1.9.2.	Cohetes en el espacio.....	301
6.1.9.3.	Satélites en órbita.....	305
6.1.9.4.	Vuelos tripulados.....	308
6.1.9.5.	De la Luna a Marte.....	310
6.1.9.6.	Hacia la era digital.....	314
6.2.	<b>La imagen de lo diminuto</b> .....	317
6.2.1.	De la fotomicrografía óptica a la electrónica.....	320
6.2.2.	Los rayos X en fotomicrografía.....	324
6.2.3.	La iluminación en fotomicrografía.....	326
6.2.4.	La fotoelectricidad en microscopía.....	330
6.2.5.	El ultrasonido.....	332
6.2.6.	La microscopía en el estudio de la fotografía.....	334
6.2.7.	La fotografía nuclear.....	338
6.2.7.1.	Marietta Blau, una pionera.....	338
6.2.7.2.	Fotografía nuclear versus cámara de niebla....	339
6.2.7.3.	El mundo sub-atómico a los ojos de la fotografía...	340
6.2.7.4.	El método fotográfico en el estudio de las partículas.	342
6.2.7.5.	Mosaicos fotográficos.....	343
6.2.7.6.	Mesones y electrones.....	345
6.2.6.	La radioactividad como fuente creadora de imágenes.....	348
6.2.6.1.	La ionografía: más allá de lo fotográfico.....	349
6.2.6.2.	Fuentes de nuevas imágenes.....	350
6.2.6.3.	La autorradiografía.....	350
6.2.6.4.	Los trazos nucleares en sólidos.....	354
6.2.6.5.	De la gammagrafía a la radiografía de neutrones...	357
6.2.7.	Átomos, genes y bits. La difracción de rayos X en biología molecular.....	361
6.2.7.1.	La física cuántica en biología.....	362
6.2.7.2.	Primeros pasos hacia un gran descubrimiento....	364
6.2.7.3.	Vida más allá de la física.....	364
6.2.7.4.	Rosalind Franklin y la fotografía Nº 51.....	366
6.2.7.5.	Más allá de la fotografía.....	372
6.3.	<b>La imagen del movimiento</b> .....	377
6.3.1.	La cronofotografía y el concepto de instantaneidad.....	377
6.3.2.	La electricidad en la imagen del movimiento.....	382
6.3.3.	La fotografía de alta velocidad.....	385
6.3.3.1.	La cámara y el estudio del movimiento.....	386
6.3.3.2.	De la exposición única a la múltiple.....	389
6.3.3.3.	La luz en el análisis del movimiento.....	393
6.3.3.4.	Más allá del espectro visible.....	396
6.3.3.5.	Los fenómenos de la luz en la imagen de alta velocidad.....	400
6.3.3.6.	La velocidad del objeto.....	402
6.3.3.7.	Características de la imagen.....	405
6.3.4.	La imagen simulada.....	406
6.3.5.	La fotografía de lapsus de tiempo.....	407

<b>CAPÍTULO 7. CONSIDERACIONES FINALES</b>	<b>427</b>
7.1. La imagen como herramienta científica.....	427
7.2. La imagen, entre el idealismo y el materialismo.....	428
7.3. De lo concreto a lo abstracto.....	430
7.4. La imagen oculta.....	430
7.5. ¿Es posible una ciencia de la imagen técnica?.....	431
7.6. Imagen, imaginación y materia.....	435
7.7. La fotografía: expresión y conocimiento.....	445
7.8. Icónica: hacia una visión integral del fenómeno fotográfico.....	455
 <b>BIBLIOGRAFIA</b>	 <b>463</b>
Origen de las ilustraciones	483

*Existen mentes que pueden recrearse contemplando con deleite magnitudes puras que se presentan a la vista como símbolos, y a la mente de una forma que sólo los matemáticos pueden concebir.*

*Hay otras que disfrutan más persiguiendo formas geométricas que dibujan en un papel, o que construyen en un espacio vacío que imaginan ante ellos.*

*Otras, en cambio, no están satisfechas hasta que consiguen proyectar toda su energía física en la escena que están evocando. A éstos, cuando comprenden la manera en que los planetas se precipitan en el espacio, les invade una sensación de enorme gozo. Y al calcular la fuerza con que los cuerpos celestes se atraen entre sí, sienten tensos sus propios músculos por el esfuerzo.*

*Para estos hombres, el momento, la energía o la masa no son meras expresiones abstractas, resultado de la indagación científica. Son palabras llenas de fuerza, que agitan sus almas como los recuerdos de la infancia.*

*En consideración a estos tipos distintos de personas, la verdad científica debería ser presentada de diferentes formas, siendo cada una de ellas científica por igual, no importa si se presenta bajo la forma sólida y con el vivo colorido de una ilustración, o con la forma tenue y pálida de una expresión simbólica.*

James Clerk Maxwell.<sup>1</sup>

# Capítulo 1: Introducción

*En este aspecto, hay una analogía entre el método fotográfico y la investigación científica: ambos sondean un universo inagotable cuya totalidad nos elude eternamente.<sup>2</sup>*

Siegfried Kracauer.

La fotografía ha dejado de ser en nuestros días ese fenómeno simple y único que hemos conocido y que se corresponde con los últimos ciento cincuenta años de su desarrollo, un período que podemos denominar como fotoquímico, para convertirse en una realidad compleja que presenta múltiples ramificaciones y que se encuentra inmersa en un vasto universo más heterogéneo y sin fronteras precisas, que podemos denominar el universo de la imagen tecnológica. Acercarse a un fenómeno tan multiforme, que ha irrumpido en nuestras vidas de forma tan insistente y apabullante, requiere atender a la diversidad de elementos y de realidades que lo componen. Las historias de la fotografía al uso, normalmente se circunscriben a la imagen documental y artística; raros son los manuales que gozan de una visión más integradora donde las aplicaciones científicas y tecnológicas tienen una mayor cabida. Sin embargo, los profesionales de uno u otro campo, ya utilicen la fotografía como medio de expresión artística, como forma de registro o documento, o como vía hacia la adquisición de conocimiento, están obligados, hoy más que nunca, a visitar la orilla contraria y perseguir en su trabajo una visión global de este medio de reproducción técnica. El hecho de que la presencia de la imagen tecnológica sea cada vez mayor en el mundo que nos rodea, de que lo iconográfico haya entrado a formar parte de cada una de las parcelas de nuestras vidas, son razones suficientes que nos obligan a la construcción de una filosofía integradora de la imagen técnica. Esta necesidad la comprobamos a diario en el terreno práctico: que el artista fotógrafo tenga entre sus manos un instrumento que es criatura de la ciencia y de la técnica, o que el fotógrafo documental se encuentre a mitad de camino entre arte y ciencia, o que el científico que utiliza la fotografía sepa que debe contar con grandes dosis de imaginación y de sentido estético para analizar los resultados o para construir nuevos modelos interpretativos de la naturaleza, lo ponen de manifiesto.

Una visión general de la imagen contemporánea se deberá construir, por tanto, sobre los cimientos del desarrollo científico acaecido durante el siglo XIX y principios del XX, y que redundó en la fabricación de los principales medios de reproducción tecnológica. La imagen de hoy se ve afectada profundamente por la irrupción de la mecanización de las técnicas de estampación tradicionales, de la litografía y las diferentes formas de fotomecánica, del gramófono y de tantos otros aparatos reproductores de sonido, de la fotografía y el cine, y de las tecnologías que hicieron posible la transmisión a distancia de sus productos: el telégrafo eléctrico, el teléfono, la radio y la televisión. La capacidad de transmitir sonido e imagen a distancia, a nivel internacional, es un hecho genuino de estos dos últimos siglos, hecho equiparable al advenimiento de la imprenta en el siglo XV. Las redes de comunicación digitales extendidas por el mundo no vienen más que a confirmar y apoyar la trascendencia de este fenómeno. Gracias a estos nuevos medios de reproducción tecnológica, la amplia mayoría de los ciudadanos, especialmente de los países más industrializados, tiene acceso a la cultura en un doble sentido. Por un lado, a través del consumo de las obras reproducidas, ya sean pinturas, esculturas, piezas arqueológicas, conciertos, o las propias fotografías. Su

procedencia puede ser además de cualquier pueblo o comunidad del planeta, gracias a la actuación de los medios de comunicación de masas y del comercio internacional. Y por otro, porque muchos de los instrumentos que hacen posible esta labor reproductiva de sonido o de imagen, entre ellos la cámara fotográfica, han quedado a disposición de todos, abriendo las puertas a la expresión personal y a la experimentación artesanal y artística de capas de la sociedad tradicionalmente apartadas de estos quehaceres. La paulatina democratización del acceso de la población a los productos de la cultura ha marchado pareja al fenómeno de globalización impuesto por las tecnologías de la comunicación y del transporte interplanetario.

La cámara fotográfica es, por tanto, un buen ejemplo de lo que se entiende por un instrumento pluridimensional y multidisciplinar. En ella están concentrados siglos de conocimiento humano, porque en su forma más básica encontramos espejos y lentes que vienen utilizándose desde las culturas más antiguas, la perspectiva, como forma racional de construcción y representación del espacio, ya presente en Euclides, y definida en términos modernos en el Renacimiento; la cámara oscura, cuyos primeros principios los encontramos ya enunciados por Aristóteles, y científicamente definidos por Alhazen en el siglo X de nuestra era; las lentes, construidas por ópticos artesanos, y perfeccionadas por físicos y matemáticos de la era moderna, abriendo las puertas al mundo de lo microscópico y de las galaxias; y así hasta llegar a las emulsiones químicas o los actuales sensores electrónicos, capaces de fijar la imagen del mundo real en soportes de diversa índole. En la cámara están también presentes facetas tan propias del ser humano como son su capacidad de expresión y su potencialidad para la adquisición de conocimiento, hechos que nos obligan a buscar una concepción unificada que entrelace estos dos caminos tradicionalmente representados por las artes y las ciencias, y que durante siglos parecen haber caminado ajenos uno del otro.

Para los profesionales y practicantes de la fotografía documental y artística sería un ejercicio muy saludable emprender un viaje de exploración hacia la otra orilla en que la fotografía ha gozado de un desarrollo sin precedentes. En un trabajo anterior<sup>3</sup>, analicé el período de formación del instrumento fotográfico a lo largo de los siglos y su utilización por la ciencia hasta 1927. En esta ocasión, mi intención es centrar el estudio en el período en el que la fotografía de sales de plata asiste a la creación de una nueva imagen tecnológica que con el tiempo acabará por desplazarla y restarle protagonismo: la imagen electrónica. Detenerse a analizar un ámbito de la fotografía, como es el de su aplicación científica a lo largo de un período de aproximadamente doscientos años, ha supuesto asumir una tarea ardua y compleja. Los elementos que se pretende ordenar, y la información que ha de ser procesada y presentada de forma coherente, han tenido que ser contemplados en un marco teórico general y en un contexto multidisciplinar que diera cabida a una gran diversidad de hechos. Estos son: la historia general, la filosofía de la ciencia, la sociedad del momento con especial atención a la formación de los productos culturales, el trabajo artesanal y artístico, y la actividad experimental que se producía en los laboratorios. He tratado, en definitiva, de bucear en la historia para construir una mirada indefectiblemente personal, pero, a un mismo tiempo, fuertemente ligada a una tradición de hacer historia y filosofía de la ciencia, caracterizada por una visión comprometida con la realidad social en la que los acontecimientos y hechos científicos y culturales han tenido lugar. ¿Qué podemos esperar de esta visita prolongada y exhaustiva a esa otra orilla donde la fotografía ha tenido un papel primordial, como instrumento fruto de una tradición experimental y milenaria de la ciencia y las tecnologías humanas, y como instrumento que ha servido y sirve de base para llegar a nuevas observaciones e innumerables descubrimientos? Una visión fundamentada en los hechos históricos es una apuesta llena de riesgos; sin embargo, nuestro recorrido se emprende con



el deseo de que los datos y la información recopilados y ordenados con paciencia y esmero puedan ser de utilidad a futuras investigaciones que quieran ahondar en esta apasionante materia de estudio.

## 1.1. Maneras de ver el mundo

La génesis de esta andadura viene dada por la sorpresa al descubrir un vacío, o un eslabón roto, en lo que ha sido la construcción de la realidad fotográfica prácticamente desde sus inicios. Y ese hueco o abismo es el que viene dado por la falta de unión o comunicación existente entre la imagen tecnológica que está al servicio de la ciencia y aquella otra que es utilizada por el arte o por el documento. Esto no es más que un reflejo del distanciamiento que existe, igualmente, entre estas dos formas del quehacer humano en la sociedad contemporánea. El fin último de todo este esfuerzo ha sido dar unos primeros pasos hacia lo que podría ser la construcción de una visión integral e histórica de la imagen tecnológica que nos rodea.

La ciencia contemporánea ha desplegado en su estudio de la naturaleza tal actividad experimental y teórica, en tantas ramas diferentes, que el volumen de conocimiento hoy día depositado en las bibliotecas científicas, nos produce la sensación de enfrentarnos a una burla del destino. La especialización a la que se ha llegado en la actualidad en el conjunto de las ciencias ha hecho avanzar el conocimiento de una forma hasta ahora desconocida por la humanidad; todo ello sobre la base de legiones de científicos repartidos por el planeta, en pequeños y grandes laboratorios, y en proyectos internacionales de unas dimensiones inusitadas en la historia. Esta es una de las razones por la que esta proeza adolece de una extrema unilateralidad, redundando en productos enajenados del resto de saberes que genera la sociedad; marchando en una sola dirección, y careciendo de la necesaria intercomunicación que debiera existir entre las diferentes ramas científicas.

En este contexto, la imagen fotográfica, y por extensión la imagen científica en general, ha cobrado un protagonismo insólito en la experimentación científica de nuestros días. No hay más que acudir a cualquiera de las revistas científicas de mayor relieve y tradición en la divulgación de resultados y de experimentos científicos, para comprobar una tendencia manifiesta y acusada por incorporar en sus páginas cada vez más elementos iconográficos. Bastaría con abrir cualquier número actual de *Nature* o de *Scientific American*, por elegir dos ejemplos de revistas de grandes tiradas editoriales, para comprobar cómo en sus páginas proliferan toda serie de ilustraciones, fotografías, gráficos, diagramas, y anuncios de empresas e instituciones especializadas en el tratamiento de imágenes; hechos que confirman la relevancia de este tipo de elementos en el quehacer científico de nuestros días. Hay quien podría argumentar que este fenómeno se debe más bien a un esfuerzo de la estructura comercial y mediática que envuelve el mundo científico por intentar vender mejor sus productos; o por crear ideología en torno a valores e intereses que trascienden el ámbito de los laboratorios, y que se adentran en el terreno de lo político o de la defensa de liderazgo económico en el mundo. Qué duda cabe que existen razones para ello; pero es preciso añadir que esta abrumadora presencia de la imagen en los escaparates de las publicaciones científicas también se debe al claro protagonismo que lo iconográfico tiene en el seno de los mismos laboratorios, al ser parte inexcusable de la instrumentación, y por ser un elemento imprescindible para la de divulgación de resultados y para la comunicación entre científicos.

El prisma teórico presente en esta obra no ha sido otro que situar la propia fotografía, y por extensión los sistemas de formación de imágenes coetáneos a ésta, dentro de ese dilema ancestral que ha estado representado a lo largo de la historia de la ciencia y de la teoría del conocimiento por el materialismo o, si se prefiere, el realismo; y por el idealismo. En definitiva, por aquellos filósofos y científicos que han defendido, de un lado, los sentidos y la experiencia como primera vía de adquisición de conocimiento y, de otro, por los que han preferido colocar en un primer plano de este proceso el razonamiento formal y simbólico, o el mundo de la especulación y de las ideas.

Esto nos obliga a defender que el aparato fotográfico y, como prolongación de éste, todo el sistema fabricante de imagen tecnológica: el cine, la televisión, el vídeo, la tecnología digital de la imagen, etc., participan de este juego de contrarios, cuyos extremos han estado representados históricamente por estas dos escuelas de pensamiento. La actualidad de esta disyuntiva la encontramos presente en la polarización que sufrió la ciencia a finales del siglo XIX entre realistas y energetistas; o a principios del siglo pasado, cuando los científicos se vieron divididos frente a los enunciados de la mecánica cuántica, y más concretamente del *principio de indeterminación*. Las palabras de Louis de Broglie, uno de los principales artífices de la mecánica ondulatoria, y promotor de la concepción dual de la materia, como ondas y partículas, son bien explícitas al respecto.

*Desde la época en que, gracias a los progresos del análisis matemático, las teorías de la física han podido tomar la forma de doctrinas matemáticas coherentes, dos tendencias han chocado constantemente en el curso de la construcción y de la renovación de estas teorías físicas. Por una parte, los físicos de espíritu intuitivo han tratado sin cesar de colocar en la base de las teorías ciertas representaciones concretas construidas mediante imágenes tomadas del conocimiento que nuestros sentidos nos procuran de los objetos materiales, a nuestra escala, que nos rodean en la vida corriente. [...] Por otra parte, algunos otros físicos de espíritu más abstracto han desconfiado de este tipo de representaciones: han pensado que el aporte esencial de una teoría física satisfactoria, no son las imágenes más o menos intuitivas, a menudo más o menos ingenuas, que han podido ayudar a los fundadores de la teoría haciendo participar su imaginación en el trabajo de su razón; lo que es esencial a sus ojos es el conjunto de las relaciones matemáticas obtenidas por la teoría, relaciones que nos permiten vincular de una manera exacta los hechos físicos observables entre sí, prever correctamente los fenómenos que podrán ser observados a partir de los que ya han sido observados.<sup>4</sup>*

También James Jeans, físico proclive a adoptar posturas idealistas en esta diatriba, expresó, no sin ciertas dudas, su opinión sobre la situación de aquellos años.

*En resumen; las dos conjeturas corresponden a los puntos de vista idealista y realista - o si lo preferimos, mentalista y materialista- de la naturaleza. Hasta ahora no hay síntomas de un retroceso, y la ley y el orden que encontramos en el universo se describen más*



*fácilmente - y creo que también se explican más fácilmente- en el lenguaje del idealismo. Así, pues, y con las reservas ya mencionadas, podemos decir que la ciencia actual es favorable al idealismo.*<sup>5</sup>

La fotografía es un fenómeno que ha ido cambiando su función, como herramienta científica y artística, a lo largo del tiempo; sin estar al margen de esta polarización en todo este período de formación que pronto cumplirá los dos siglos. Aunque es cierto que ha cumplido una función objetivadora de la realidad durante gran parte de este tiempo, a través de la potenciación de la capacidad de observación del ser humano, y de la verificación de los fenómenos observables a partir del registro de las luces y las sombras que los objetos naturales proyectan sobre sus emulsiones; qué duda cabe que esta función, alineada durante la mayor parte del siglo XIX con las posiciones más afines al positivismo y al materialismo, sufrió una primera crisis a principios del siglo XX. Concretamente, cuando determinados científicos de renombre replantearon el papel desempeñado por la observación en el método científico. En la actualidad, este proceso se ha revalidado. La visualización de los fenómenos que nos rodean está experimentando una profunda transformación a raíz de la aparición de la tecnología digital electrónica, entre otras razones, porque el soporte químico de las emulsiones de la fotografía clásica nunca permitió un control de la imagen en la misma medida que los actuales sensores electrónicos. Una revisión epistemológica del método científico y del proceso de observación en la ciencia vuelve en estos días a saltar a la palestra a partir de estos últimos acontecimientos.

## **1.2. Historia y filosofía de la ciencia fotográfica**

La propia fotografía y la imagen técnica en general se han encargado de demostrarnos que nos enfrentamos a un fenómeno abierto en continua transformación. Desde los primeros dibujos realizados con criterios racionales y científicos, con la ayuda de todo tipo de instrumentos, ya fuera con el velo tenue montado sobre bastidor de Alberti, o con la ventana de vidrio de Leonardo, o con aquellos otros más próximos a la óptica, como la cámara oscura, la cámara lúcida, el microscopio o el telescopio, hasta la llegada de la imagen sintética proporcionada por los ordenadores, el mundo de la representación iconográfica en la ciencia se ha comportado como un continuo, y como una realidad que goza de múltiples manifestaciones. La fotografía es un eslabón de una cadena de instrumentos, caracterizados por permitir la fijación de la imagen en toda suerte de soportes. Como el resto de las tecnologías de la imagen, está sujeta a las condiciones que impone el desarrollo histórico.

Esta visión del fenómeno fotográfico en el tiempo se extiende a otros ámbitos en los que la cámara queda enmarcada. En primer lugar, el de la instrumentación científica en general, puesto que la fotografía es una herramienta más dentro de los instrumentos de observación; y, más en particular, de los instrumentos ópticos. El conocimiento científico y el establecimiento de nuevas leyes y principios mantienen una relación dialéctica con el conjunto de la instrumentación puesta a su servicio, siendo éste un hecho fácil de constatar en los mismos dispositivos proveedores de imagen. Telescopios, microscopios, espectroscopios, cámaras fotográficas, fotómetros, interferómetros, tubos de rayos catódicos, refractómetros, aceleradores de partículas, etc., han sido herramientas decisivas en el avance científico al haber suministrado datos fundamentales para la constitución de las leyes y las hipótesis científicas. Pero al mismo tiempo, estas leyes han potenciado la creación de nuevos instrumentos de visualización, estableciéndose así un ciclo

que se extiende hacia el infinito. La simbiosis que se establece entre pensamiento e instrumentación, o lo que es lo mismo entre teoría y experiencia, es una realidad que está sujeta a los vaivenes de la historia. Las *imágenes físicas* por un lado, o imágenes mentales que los científicos conforman en el interior de sus mentes, al modo de construcciones teóricas capaces de relacionar y dar sentido a los datos provenientes de la experiencia, y las imágenes reales, por otro, facilitadas por los instrumentos de visualización, son productos del devenir histórico; y la relación que se establece entre ambas obedece a un momento concreto de la cultura humana. Esto nos obliga a adoptar una perspectiva abierta frente a esta realidad dinámica y en continua evolución, y a situar los hechos bajo el enfoque de una historia social de la imagen técnica.

Si comenzamos por observar la ciencia desde la orilla de la filosofía, presenciamos a primera vista que sus herramientas básicas son principalmente dos: los instrumentos científicos, como resultado y prolongación de nuestra acción sobre la naturaleza, y la razón, entendida como la capacidad que tiene el ser humano para comprender lo existente. Experiencia y razón responden a la actividad práctica que ejercemos día a día sobre la naturaleza, y a la fuerza que ésta impone sobre nosotros. Al decir esto, indefectiblemente uno adopta una posición concreta dentro de la teoría del conocimiento, pues siempre se termina por emplazar las ideas propias en un lugar u otro. ¿Es necesario acudir a la teoría del conocimiento para hablar de fotografía? ¿Es preciso retrotraerse a la Grecia clásica para interpretar el mundo iconográfico que nos rodea? La complejidad del fenómeno fotográfico, que comprobamos en la multiplicidad de términos existentes, de tecnologías que la sustentan, de formas y estilos, de utilidades, realmente exigen este esfuerzo y reflexión. Si hablamos de razón y experiencia, de espíritu y materia, de especulación y observación, o de teoría y práctica, es porque la imagen tecnológica en su conjunto no escapa a esta disyuntiva. El instrumento fotográfico, en sus múltiples formas, es una herramienta que se construye en un principio para facilitar la observación de los fenómenos. Cuando es acoplada al telescopio, al microscopio o al espectroscopio, esta capacidad se eleva aún más por la potenciación y profundización que estos instrumentos consiguen otorgar a la visión humana. Esto nos lleva a pensar, en una primera aproximación, que la plasmación de las luces y las sombras de la realidad en una superficie determinada apuesta por el lado material de esta polarización entre razón y experiencia. Al fin y al cabo, la fotografía es parte integrante del método experimental en ciencia, al ser un utensilio que se pone al servicio de la observación, pieza fundamental, junto a la medición de los fenómenos, de la práctica científica. De aquí, que los positivistas y materialistas se sintieran arrojados durante la mayor parte del siglo XIX por el respaldo de la fotografía. A la vez, y no es casualidad, sintieron el espaldarazo de una cultura avivada por un tipo de literatura y arte, representados por el realismo y el naturalismo, que fueron en verdad grandes murales fotográficos de la condición humana.

El polo contrario de esta disyuntiva no se quedó de brazos cruzados. El idealismo, especialmente en filosofía, siempre ha apostado por el pensamiento o las ideas, antes que por los sentidos. Su parecer es que los instrumentos mismos son el resultado del pensar y el discurrir humanos. Para ellos, la realidad que nos rodea debe ser interpretada, tarde o temprano, con la mente, herramienta única y realmente humana, que nos permite llegar a la esencia de las cosas. El secreto de este poderoso recurso radica en ser partícipe de algo más profundo y abstracto, que es el espíritu. Y si ahondamos en este discurso, el espíritu será siempre parte de una Idea que todo lo contempla, y que subyace a cada acción y observación humanas. Para muchos, este proceso de abstracción no puede terminar sino en Dios. Para esta corriente de pensamiento, las formas son más importantes que los objetos en sí; las estructuras lo son más que los datos sensibles; y, en última instancia, la teoría se sobrepone a la práctica. Tras casi un siglo de dominio de los

postulados de corte positivista en ciencia, el idealismo cobró nuevas fuerzas con el movimiento de los pragmatistas, surgido a finales del siglo XIX, escuela de pensamiento con ramificaciones que se extendieron hasta la revolución cuántica y relativista. En esta renovación de la física de principios del siglo XX, el papel de la fotografía no quedó indemne. Los aparatos de medición y observación pasaron a ser parte del mismo fenómeno que se estudiaba. Hasta entonces, el científico observador se había mantenido al margen del objeto estudiado, contemplándolo como un fenómeno exterior cuyo comportamiento era ajeno a la acción de su mirada. Sin embargo, al inmiscuirse la ciencia en el estudio del universo atómico y de la luz, esta posición resultó inviable; la interacción entre utensilio y realidad debía ser tenida en cuenta. Las dos escuelas de pensamiento se vieron abocadas, por tanto, a tomar nuevas posiciones.

Esta visión de los hechos nos demuestra que la fotografía, como instrumento científico, debe ser contemplada bajo la perspectiva de la historia del pensamiento. Como herramienta al servicio del arte - lo comprobaremos más adelante - tampoco escapa a esta dicotomía. Cualquier científico o artista, que hace uso de la imagen tecnológica, puede circunscribirse en su práctica diaria a lo concreto y a las imágenes que son resultado de su trabajo y de sus instrumentos; pero el sentido de su obra adquiere irremediamente una determinada posición en el contexto de la historia y del pensamiento. Ahí radica, a mi entender, el secreto de las grandes y pequeñas obras, en su contribución al desarrollo tanto del arte como de la ciencia.

### 1.3. Imagen e imaginación

Incluir la filosofía de la ciencia como uno de los pilares en los que se sustenta la mirada de este libro se debe también a la necesidad de interpretar y dar cabida a un elemento íntimamente relacionado con el objeto de este estudio, que es el de la imagen mental. Una vez llamada *imagen física*, otras imaginación, otras representación, es un concepto que sale a relucir frecuentemente en los escritos de corte filosófico de numerosos científicos y en la obra de muchos filósofos contemporáneos que se acercan al mundo de la ciencia. Parece como si la disyuntiva de la que hablábamos, entre pensamiento y materia, cobrara nueva vida en esta doble dimensión de lo visual a medida que la ciencia va adquiriendo un mayor protagonismo. ¿Es pura coincidencia que la representación como imagen de lo real que se refleja en nuestro interior, cobre una vigencia inusitada en los escritos científicos y filosóficos precisamente en un siglo en el que la fotografía aparece? ¿Es casualidad, siguiendo el pensamiento de Heidegger, que la civilización, y más en concreto la occidental, adopte una imagen de sí misma, a diferencia de épocas anteriores, precisamente en la era contemporánea, que es la era de la imagen tecnológica? Con el avance de las ciencias, el mundo de la memoria, de los sueños, de lo imaginado, de la fantasía y de la ilusión se desprende del ámbito de la mística y de lo esotérico para formar parte de su competencia. Hacia finales del siglo XIX, estos conceptos comienzan a formar parte del discurso de la ciencia, una vez que la psicología y la fisiología pasan a regirse por criterios más racionales. El conocimiento deja de ser algo que se produce por acción exclusiva del exterior sobre lo sensorial, y comienza a tener en cuenta la maquinaria interna que bulle en nuestras cabezas. Pero ya no se trata de un estamento inmaterial y espiritual tal como era comprendido por la escolástica o por el idealismo dieciochesco, sino que será un componente originado en un substrato orgánico y visceral, como en Schopenhauer; en estímulos y corrientes que recorren nuestro sistema nervioso, como en Weber y Fechner; en procesos sensoriales, siguiendo a Mach, o en dinamismos que tienen lugar en la frontera entre la conciencia y la inconsciencia, como saldrá a relucir en Freud<sup>6</sup>. La imagen

interior, como afirmará posteriormente Sartre en *La imaginación*, se convierte en una parte más de nuestra conciencia, de nuestro pensamiento, siendo en definitiva parte activa del razonamiento humano.

*No hay, no podría haber, imágenes en la conciencia. Pero, la imagen es un cierto tipo de conciencia. La imagen es un acto y no una cosa. La imagen es conciencia de algo.*<sup>7</sup>

Esta dualidad que nos viene dada por la imagen artificial que representa los objetos del mundo, y esa otra imagen construida en terreno de nadie con el material de los sueños, cobra hoy día especial vigencia a partir de que la imagen tecnológica actual construye mundos virtuales y simulados, a modo de hipótesis, que van más allá de lo observado. Algoritmos procesados por autómatas lógicos cuyos resultados son imágenes sintéticas que se nos presentan cual apuestas interpuestas entre el yo y la experiencia.

Cada imagen técnica, por tanto, goza de unos presupuestos epistemológicos propios. Cada fase de desarrollo de los instrumentos de observación, captación y registro pertenece a un momento histórico determinado que los demanda y apremia. Al igual que la visión dominada por la perspectiva renacentista fue algo requerido por el nuevo universo social y económico que construía el capitalismo emergente de la época, la *nueva visión*<sup>8</sup>, tal como Moholi Nagy gustaba denominar a la fotografía, cobra sentido en el espacio y el tiempo de las estructuras socioeconómicas modernas. La fotografía química, la imagen electrónica analógica y la imagen electrónica digital pertenecen a momentos distintos del devenir de la humanidad, adquiriendo cada una de ellas un sentido en el contexto histórico en el que se desenvuelven. El conocimiento humano no es algo etéreo y abstracto que se acumula sin más, sino fruto de la acción recíproca que se produce entre la naturaleza y nosotros, como parte de ella. Y la imagen no escapa a este condicionamiento; cada imagen tiene su época, su siervo y su dueño. Una filosofía de la imagen está llamada, pues, a desentrañar esta esencia práctica de los hechos.

En este intento de repensar la imagen que nos rodea, y más concretamente en el uso que hace de ella la ciencia, es importante detenerse también a analizar la función que cumplen sus productos, ya sean fotografías fijas o en movimiento, ya sean de substrato químico o electrónico, en relación con otros tipos de imágenes y en relación con otros productos instrumentales. La imagen actual es poliédrica y multifacética. No sólo existe la imagen conformada por las leyes de la perspectiva, con un punto de fuga y emuladora de la visión humana; la imagen científica adopta múltiples formas, y es tan versátil como la realidad misma. Trazos, puntos, franjas de interferencia, destellos, marcas, manchas, etc., son también imágenes útiles para la ciencia, que no satisfacen las leyes de un espacio racional marcado por la perspectiva. La tridimensionalidad complica y enriquece aún más este panorama. Algunas imágenes aportarán una información cualitativa, otras ofrecerán un sentido y una medida. Por tanto, ¿cómo comprender estas sombras tan variopintas en relación con otras imágenes, incluso con sonidos o con olores? ¿Qué medida o información nos ofrecen si las comparamos con los datos que procuran otros instrumentos, como pueden ser números, voltajes o temperaturas? ¿Qué razones epistemológicas acompañan a unos y a otros? ¿Hasta qué punto las conclusiones del científico se ven afectadas por la presencia de una imagen, de una medida cuantificable o de un diagrama? ¿Pertenecen sus productos a la iconografía o a la lógica?<sup>9</sup>. La imagen ha entrado a formar parte de la instrumentación científica, y es algo más que una mera representación de lo observado, es pieza decisiva de la misma acción de la ciencia porque es pura acción científica. La imagen ha



trascendido ser confirmación de lo sensible para convertirse en una prolongación de la percepción activa del hombre.

#### **1.4. 1927: el conocimiento en la encrucijada**

*Fotografía y conocimiento* está íntimamente relacionado con mi anterior libro, antes citado, que dediqué por entero al análisis del papel desempeñado por la fotografía en la adquisición de conocimiento científico, en el período que comprende desde los antecedentes y orígenes del instrumento fotográfico hasta el año 1927. Este año fue elegido por una doble razón: por especial atención al *principio de incertidumbre*, formulado ese año por Werner Heisenberg; y en segundo lugar, por ser el año en el que se demuestra experimentalmente, por medios fotográficos, la doble naturaleza de la materia. La difracción del electrón, constatada por Germer y Davisson cuando proyectaban un haz de electrones sobre placas de níquel, demostró que este elemento constitutivo de la materia se comporta como onda y partícula a un mismo tiempo. A su vez, el postulado de Heisenberg supuso un punto de inflexión en la epistemología científica por cuestionar la función de la observación y de los instrumentos de visualización de fenómenos naturales en la adquisición de conocimiento. El análisis del mundo microscópico, en el que la fotografía jugaba un papel determinante, se enfrentó a un serio impedimento antepuesto por el universo de las partículas atómicas. El poder de resolución de los instrumentos ópticos, o lo que es lo mismo, su capacidad de discernir los elementos más pequeños posibles, llegó a un límite impuesto por las propiedades de la luz utilizada en hacer visible las partículas, y por la interacción ineludible de los propios instrumentos de observación con los objetos observados. Esta limitación impide determinar, con certeza absoluta y de forma simultánea, la velocidad y la posición de cualquier partícula en estudio. Esta espada de Damocles, consustancial a la teoría cuántica, defensora de la discontinuidad en la manifestación de los fenómenos naturales, y, más en concreto, de las radiaciones, sigue clavada en el corazón de la ciencia; en especial, de aquella dedicada al análisis del universo subatómico. Este principio ha obligado al conjunto de la ciencia a adoptar nuevos planteamientos metodológicos en los que la probabilidad juega un papel determinante. Como se verá a lo largo de estas páginas, la imagen técnica en todas sus formas, ha desempeñado un papel de primer orden en este nuevo panorama abierto a la ciencia.

#### **1.5. La imagen técnica en construcción**

La materia de estudio de aquella obra, por tanto, está muy próxima a lo que en estas páginas será tratado; de hecho, los periodos históricos contemplados en una y otra se solapan a lo largo de muchos años. En verdad, y esa ha sido la idea subyacente a ambos trabajos, se trata de dos recorridos complementarios. Pero en esta ocasión, la cuestión se centra en la relación que se establece entre uno y otro tipo de imagen, entre la fotográfica química y la electrónica; y en qué manera, una y otra, han favorecido el desarrollo de la ciencia. Si en aquel trabajo fue la fotografía de sales de plata la protagonista, asistiéndose al ciclo completo de su formación como instrumento científico; ahora, lo son ambas, con la particularidad de que será la imagen electrónica la que en esta ocasión nos muestre en detalle su proceso de gestación y formación. De hecho, el año elegido para concluir nuestro trabajo es aquel en que la imagen electrónica analógica, desarrollada a lo largo de casi dos siglos, da paso a la imagen creada por la tecnología digital. Esta transformación que se produce en el seno de la imagen electrónica marca un antes y un después en el universo de la imagen tecnológica en general; al tiempo que ha

cuestionado el futuro de la fotografía clásica, relegada hoy a un segundo plano, si no a su progresiva desaparición, al menos, en el ámbito de las aplicaciones científicas.

Al contemplar el fenómeno de la representación iconográfica al servicio del trabajo científico son cuatro las fases - o los paradigmas, si se prefiere - que destacan en la historia, en consonancia con las tecnologías en que se sustentan. Como se desprende del cuadro (Cuadro N° 1), las tecnologías son acumulativas, lo que significa que se solapan en el tiempo, como instrumento de ayuda a la ciencia. De cualquier forma, cada una de ellas resultará siempre más apropiada para determinados fines de investigación; y, normalmente, será la última en aparecer en el escenario histórico la que adopte un claro papel de vanguardia y de mayor protagonismo en el avance de la ciencia. Es importante señalar que el fenómeno de la imagen en la ciencia trasciende la fórmula exclusiva de representación de los objetos naturales en una superficie de dos dimensiones, tal como ocurre con las fórmulas más convencionales de la fotografía o la imagen vídeo. Como se verá a lo largo de estas páginas, la imagen es un fenómeno multifacético que encierra miles de posibilidades. Gráficos, maquetas, holografías, modelos, diagramas, petrografías, moldes, simulaciones, fractales, imágenes virtuales, líneas de escáner, etc., componen un vasto universo que completa aquella otra imagen más común y conocida. La imagen mental, por último, producto de la imaginación, la fantasía, la abstracción, los recuerdos, o los sueños, culmina esta visión, al ser una herramienta más e indispensable en el proceso científico.



Cuadro N° 1

Las primeras formas de representación son aquellas que no están necesariamente ligadas a un período industrial de la historia, ni a medios de reproducción tecnológica y mecanizada. La utilización de estos procedimientos manuales para fines científicos se remonta a los orígenes de los tiempos. Dibujos, modelos, grabados, diagramas, o maquetas, son formas de representación visual que anteceden a la técnica fotográfica, cuyo uso se mantiene hasta nuestros días. Es cierto que los cada vez mayores grados de automatismo a los que está abocada la humanidad, y la práctica científica en particular, están relegando estas técnicas a un segundo plano; especialmente, desde la llegada de los ordenadores personales y de los programas informáticos de representación gráfica. Sin embargo, su papel en la historia ha sido de suma importancia, y su utilización sigue vigente en muchas ramas de la ciencia donde se las prefiere por su mayor adecuación a fines expositivos y didácticos, o por su proximidad a un sentido manual y artesanal del trabajo en los laboratorios.

El foco de atención en esta ocasión está puesto principalmente en las dos tecnologías siguientes: la fotografía y la imagen electrónica analógica. El período de incubación de la primera se extiende a lo largo de los siglos y se consolida cuando los procesos fotográficos quedan definidos y controlados científicamente. Un hito en este desarrollo viene dado por la aparición de la emulsión de gelatina en seco, al bromuro de plata. Este es el compuesto químico que afianza la fijación de las leyes de la sensitometría, ciencia que relaciona numéricamente la cantidad de luz recibida por la emulsiones con el ennegrecimiento de las sales de plata en ellas contenidas. Este ciclo, representado por la fotografía en blanco y negro, y en color, continúa abierto hasta nuestros días. Se trata de un procedimiento que se mantiene vigente en el ámbito documental y artístico, a pesar de haber entrado en una fase de decadencia en lo que respecta a sus aplicaciones científicas y a un uso doméstico.

La segunda tecnología de carácter fotográfico que aparece en la historia se corresponde con la imagen electrónica analógica. Sus antecedentes pueden situarse hacia finales del siglo XVIII, coincidiendo con los primeros intentos por producir imágenes por medios eléctricos; concretamente, con los grabados y figuras en relieve por el método de la galvanoplastia, y con la creación de figuras y trazos geométricos, por procedimientos electrostáticos (Figuras de Lichtenberg). A lo largo del siglo XIX, la electricidad va proporcionando nuevas formas de representación de fenómenos físicos a partir del desarrollo de la ciencia de la fotoelectricidad. En estos años de gestación, la imagen electrónica tiene como testigo la fotografía química, con la que mantiene una relación de interdependencia y ayuda mutua. En el siglo XX, este ciclo de gestación de la imagen producida por procedimientos eléctricos comienza a cerrarse, una vez que la electrónica se consolida como ciencia al ir afianzándose el conocimiento de los procesos electromagnéticos. Recién estrenado el siglo, comienzan a fabricarse las válvulas termoiónicas, fundamentales para el lanzamiento de la radio, y los tubos de rayos catódicos, que darán lugar al iconoscopio y la televisión electrónica. A un mismo tiempo, se consolidan los principios de la óptica electrónica, como queda patente con la aparición del microscopio electrónico, un instrumento decisivo en el futuro desarrollo de la ciencia.

Estas dos tecnologías, o paradigmas de la imagen, serán de vital importancia en la construcción de nuevos instrumentos de visualización, indispensables para el avance científico. No obstante, a medida que el siglo XX avanza, asistimos a una pérdida continuada de protagonismo de la fotografía convencional, en favor de las distintas formas de imagen electrónica. Estas últimas dispondrán con los años de un mayor control de los fenómenos luminosos y electromagnéticos, y mayor sensibilidad y rapidez en la obtención de resultados; especialmente, cuando se trata de objetos que requieren ser estudiados y representados en movimiento, o con niveles de luminosidad mínimos. El desarrollo de esta tecnología se verá eclipsado tan solo por la aparición en la década de los setenta de la tecnología electrónica digital, tecnología que se impone paulatina y abrumadoramente en el conjunto de las disciplinas científicas.

Nuestra última fase, por tanto, se corresponde con esta tecnología, que procesa digitalmente las señales electrónicas, y que surge a partir de la invención de los sensores electrónicos de estado sólido, entre ellos, los CCD (Charged Couple Devices). Estos dispositivos, ideados por W. S. Boyle y G. E. Smith a principios de 1970<sup>10</sup>, y comercializados en 1973, son los artífices de lo que conocemos hoy día como imagen electrónica digital. La conjunción de esta tecnología con la informática nos obliga a contemplar la imagen como un fenómeno comprendido en un concepto más general y abarcador que es el de la información.

Es importante señalar que el universo de la imagen tecnológica trasciende un esquema simplificador como el expuesto. La complejidad del proceso de producción de los distintos tipos de imagen en ámbitos científicos, reprográficos, documentales o artísticos, es un hecho tan evidente a lo largo del siglo XX, que supera cualquier visión reduccionista acerca del fenómeno. Esto nos obliga a recapitular insistentemente sobre los hechos del pasado en aras de dar cabida a nuevas formas de producción de imágenes. El modelo de actuación ofrecido por la fotografía basada en los haluros de plata resulta caduco, tan pronto como aparecen en la historia nuevas fuentes de energía y nuevos instrumentos de observación, no necesariamente dependientes de este tipo de sales. Es más, a lo largo del siglo XX, se retoman prácticas y ensayos correspondientes a fases tempranas de la fotografía, dando lugar a nuevas formas de producción de imágenes, denominadas en su día *no convencionales*. Por encima de la imagen producida por las sales de plata y de aquella otra que obedece a procedimientos fotoeléctricos, encontramos otras formas de generación de imágenes que responden a otros procesos, tales como los reprográficos o los de artes gráficas, o incluso, a otros tipos de radiaciones más allá de la luz visible, como la ultravioleta, la radioactividad, el infrarrojo, la radio o el propio sonido.

## **1.6. Dos siglos decisivos: 1777- 1975.**

El eje central que articula el contenido de este libro es la historia de las tecnologías de la imagen comprendidas entre finales del siglo XVIII y 1975. No obstante, se atiende prioritariamente a las dos tecnologías que presentan un mayor peso en la fabricación de imagen tecnológica, y que están ligadas a modos de producción industriales: la fotografía de sales de plata y la imagen electrónica analógica. Unas veces serán estudiadas de forma independiente, por haber sido utilizadas con exclusividad en cuantiosas aplicaciones científicas; en otras, en cambio, serán contempladas al unísono, al preferir la ciencia su utilización conjunta. Ni que decir tiene que tanto las formas de representación pre-industriales (dibujo, modelos, grabados, etc.) como los sistemas *no convencionales* y la tecnología digital, se tienen ampliamente en cuenta para lograr una visión de conjunto, y proporcionar una perspectiva histórica. Es más, se incluyen ejemplos de imágenes científicas posteriores a 1975, por entenderse que el lector puede beneficiarse ampliamente de conocer los antecedentes históricos de las tecnologías que las hacen posible.

Este período de dos siglos se ha dividido a su vez en cuatro fases bien delimitadas. La primera cubre los años primeros en los que la electricidad y el magnetismo comienzan a producir una serie de imágenes que podemos considerar *no ópticas*, y que se deben a un aprovechamiento de este tipo de energía para la obtención de grabados, relieves, o para registrar los trazos correspondientes a señales e impulsos eléctricos. En este período será determinante analizar en qué medida la fotografía se ve afectada por la irrupción de las nuevas técnicas que arriban con el control de los fenómenos electromagnéticos. Son años que serán observados desde la perspectiva de la imagen tecnológica imperante en la época: la fotografía de las sales de plata. Sin embargo, nuestro interés se centrará en la relación recíproca que se establece entre este tipo de fotografía y los fenómenos producidos por el electromagnetismo. Como comprobaremos, la primera se ve profundamente influenciada por la progresiva incorporación de elementos eléctricos a sus procedimientos; es el caso de las nuevas técnicas de iluminación artificial, de los mecanismos de obturación de las cámaras, o de la fotometría. Y en sentido contrario, la fotografía prestará un servicio inestimable al estudio de la formación de las primeras imágenes producidas por la acción de la electricidad y de los primeros tubos de vacío.



La fase siguiente se caracteriza por el perfeccionamiento de los tubos de vacío y por la llegada de la fotoelectricidad, como rama independiente dentro del electromagnetismo. Esta nueva disciplina, encargada de estudiar la relación recíproca que se establece entre la luz y los fenómenos electromagnéticos, se sustenta en tres hechos físicos que son descubiertos a lo largo del siglo XIX: el efecto fotoeléctrico, el de fotoconducción y el de fotoemisión<sup>11</sup>. Estas tres nuevas manifestaciones de lo eléctrico, una vez que son estudiadas en profundidad en el seno de los laboratorios, son decisivas para el desarrollo de la fotometría, del análisis espectral, de las células fotoeléctricas, y para el entendimiento de la interacción existente entre luz y materia. Por su parte, la experimentación con los tubos de vacío da lugar a importantes descubrimientos como son los rayos catódicos, los rayos canal, los rayos X y el aislamiento del electrón. Estos hechos tienen una gran incidencia en lo que será la imagen electrónica, tanto en la que depende de los tubos de rayos catódicos, como de las distintas técnicas derivadas del uso de los rayos X. Pocos meses después del importante descubrimiento de Röntgen, H. Becquerel registra de forma accidental, en placas fotográficas, las emanaciones radiactivas de las sales de uranio. Los fenómenos electromagnéticos unidos a este importante hallazgo contribuirán a dar un giro copernicano a la ciencia, rompiendo con una tradición que se remonta a cientos de años. La imagen fotográfica generada por los rayos X, la radioactividad y la cámara de niebla, contribuirán a construir un nuevo tipo de ciencia, arropada por dos grandes teorías físicas del siglo XX: la mecánica cuántica y la relatividad.

Al tiempo que la fotoelectricidad da sus primeros pasos, la fotografía consolida sus procedimientos técnicos con la incorporación de las emulsiones de gelatina en seco al bromuro de plata, técnica que facilita la producción industrial de placas, papeles y películas. Esta nueva amalgama ayuda a romper con una tradición de casi medio siglo en fotografía, caracterizada por la elaboración artesanal de las emulsiones, y a fijar las leyes de la sensitometría, lo que redundará en una mayor estabilización de las técnicas fotográficas.

Una tercera fase de este proceso se abre con la entrada del nuevo siglo en la era de la radio, una vez que la fabricación de válvulas electrónicas: diodos y triodos, hace posible el envío de señales a distancia sin la necesidad de cables. Si las telecomunicaciones en su conjunto han estado desde sus orígenes ligadas a la producción y transmisión de imágenes, en esta fase, dominada por el nacimiento de la electrónica, el proceso se consolida. Desde entonces, comunicación a distancia e imágenes técnicas quedarán fuertemente entrelazadas hasta nuestros días. A principios del siglo pasado, se produce asimismo la formación de la imagen electrónica como tal, una vez que se consigue un mayor perfeccionamiento en la fabricación de los tubos de vacío y un mayor control sobre las radiaciones que tienen lugar en su interior. Estos avances dieron lugar a la construcción del osciloscopio, de los diferentes tubos de imagen y de la televisión electrónica. A un mismo tiempo, el control técnico de la producción de electrones permite el desarrollo de nuevas técnicas de visualización como son la espectrografía de masas, la difracción de rayos X, la de electrones, y los nuevos modelos de cámara de niebla. Estas innovaciones ayudarán a comprender en mayor profundidad el comportamiento de los electrones, a fijar las leyes de la óptica electrónica y a idear instrumentos de la importancia del microscopio electrónico. La tecnología radio, por su parte, dará lugar a múltiples métodos de generación de imágenes, que desempeñarán un papel esencial en áreas como la radioastronomía, la teledetección, o la exploración submarina.

En el período 1900-1940, los dos tipos de imagen tecnológica predominantes: la fotográfica y la electrónica, se apoyan mutuamente con su presencia, en la mayoría de los laboratorios y centros de investigación. Los impulsos y señales

captados por instrumentos electrónicos, como el osciloscopio, el microscopio electrónico, las diferentes cámaras de expansión, quedan registrados en placas fotográficas. Y viceversa, los trazos y figuras registrados por las emulsiones comenzarán a ser leídos y almacenados por nuevos dispositivos electrónicos de lectura y memoria, período que culminará con la incorporación de los primeros ordenadores a partir de la segunda mitad de este siglo.

Tras la segunda guerra mundial se abre una época de consolidación de las técnicas de producción de imágenes, en la que predominan las fórmulas híbridas y multidisciplinarias. Los procedimientos se multiplican, y las posibilidades se expanden en todos los sentidos: nuevas radiaciones, nuevos compuestos fotosensibles, materiales semiconductores, y primeros procesamientos digitales de señales. Teniendo en cuenta esta proliferación de tecnologías de la imagen, se abre un nuevo capítulo en esta investigación, centrado en tres áreas de aplicación fundamentales: la imagen de lo lejano, de lo diminuto, y del movimiento. Ni que decir tiene que las aplicaciones científicas de la imagen trascienden estos campos; pues son bien conocidos sus usos en topología, geología, antropología, psicología, estudios forenses y judiciales, etc.; sin embargo, si he centrado la atención en estas tres áreas más próximas a la física es por considerar que se encuentran más próximas a las intenciones fijadas en este libro, que no son otras que analizar la relación de la imagen tecnológica con el conocimiento. En líneas generales, la materia de este extenso capítulo versará sobre la imagen en la astronomía, en el mundo microscópico y en los fenómenos de alta velocidad.

Como se desprende de este esquema temporal, los periodos reseñados obedecen más a criterios expositivos y didácticos que a la realidad de los acontecimientos. Las tecnologías conviven a lo largo de los años, y sus orígenes y desenlaces escapan a la delimitación impuesta por las fechas o por compartimentos temporales estancos. El universo de la imagen tecnológica se nos presenta con grandes dosis de complejidad por ser un fenómeno relativamente reciente y multifacético. Esta diversidad impide una demarcación precisa de sus tecnologías, de sus periodos históricos, y de la propia terminología que la describe y define. Toda ciencia, al avanzar en el tiempo, va construyendo un lenguaje propio que se articula a partir de los fenómenos que intenta explicar, y que cambia en consonancia con los nuevos hechos que van surgiendo ante los ojos de los investigadores. La enunciación de conceptos y leyes que estructuran y dan sentido al conocimiento desvelado por una rama científica determinada, origina un argot propio que crece de forma natural y paulatina. Luego, éste queda respaldado por el refinamiento propio que le otorga el lenguaje matemático, en aquellas disciplinas científicas más proclives a ello. Este lenguaje especializado gana en precisión, pero pierde en distanciamiento respecto del público general. Las tecnologías de la imagen son presas también de este fenómeno de exclusividad y de incomprensión debido a la proliferación de múltiples formas, técnicas, procedimientos y lenguajes cada vez más depurados y especializados. Paradójicamente, esta prolijidad de medios de observación tan sofisticados nos impide obtener una visión de conjunto al respecto, hecho que redunda en la dificultad de comprender el gran bosque de la iconografía que nos rodea.

# Notas del capítulo 1

- <sup>1</sup> Cita de Maxwell extraída de un discurso pronunciado ante la British Association en 1873, y que sirve de prólogo a la obra *Nuclear Physics in Photographs*, de C. F. Powell y G. P. S. Occhialini, Ed: Oxford at the Clarendon Press, 1947.
- <sup>2</sup> Kracauer, S. *Teoría del cine*. Paidós. 1996. p 42. *Theory of film. The Redemption of Physical Reality*. Oxford Univ. Press. 1960.
- <sup>3</sup> Cuevas, José. *Fotografía y conocimiento: la fotografía en la ciencia hasta 1927*. Editorial Complutense, 2007.
- <sup>4</sup> Broglie, Louis de. *Teorías abstractas y representaciones concretas en la física moderna. En Continuidad y discontinuidad en la física moderna*. Título original: *Continu et discontinu en Physique Moderne*. Espasa Calpe, 1957. p 89 y 90....
- <sup>5</sup> Jeans, James. *Nuevos fundamentos de la ciencia*. Espasa Calpe. 1936. p 237-8.
- <sup>6</sup> El idealismo más reclacitrante vio este movimiento *cientifista* como una concesión al materialismo de la época; mientras que este último, especialmente el dialéctico post- marxista, no dudó en interpretarlo como un encubrimiento velado de las posturas más idealistas. Ver al respecto *Materialismo y empirocriticismo*, de V. I. Lenin; o *El asalto a la razón*, de Georg Lukacs. Ed. Grijalbo, 1972.
- <sup>7</sup> Sartre, Jean Paul. *La Imaginación*. Edhasa 1980. L'Imagination. p 129....
- <sup>8</sup> Moholy-Nagy, L. *La Nueva Visión*. Buenos Aires, Ed. Infinito, 1985. ["Von Material zur Architektur", 1929]...
- <sup>9</sup> La obra capital de Peter Galison, *Image and Logic*, defiende esta separación conceptual en torno a la ciencia y la tecnología actuales. Galison, Peter. *Image and Logic. A Material Culture of Microphysics*. The University of Chicago Press. 1997.
- <sup>10</sup> Boyle, W. S. y Smith, G. E. *Charged Coupled Semiconductors Devices*. The Bell System Technical Journal. Abril de 1970. p 587 y ss.
- <sup>11</sup> Zworykin, V. K, Ramberg, E. G. *Photoelectricity and its Application*. John Wiley and Sons, 1949. p 1.



## Capítulo 2: Fotografía y electricidad. Una mirada retrospectiva

### 2.1. El ámbar y la sombra: Tales de Mileto

*“En el principio era Nu, masa líquida primordial, en cuyas infinitas profundidades, se agitaban, confusos, los gérmenes de las cosas”<sup>1</sup>*

Estas palabras fueron encontradas en un papiro egipcio, difícil de datar en el tiempo, pero probablemente escrito alrededor del siglo VI antes de nuestra era. No son palabras gratuitas y sin trascendencia. Decir en aquella época que en el principio de las cosas, del mundo, se encontraba una masa informe y líquida, caldo de cultivo de los principios de la vida, y no un ser poderoso y omnipresente, hacedor del universo y causa de nuestras desgracias y alegrías, tuvo que ser un gran atrevimiento a la vez que un reto a una tradición milenaria en la que el conocimiento humano estaba ligado a la superstición y a la inspiración esotérica o divina de sacerdotes, curanderos y gobernantes. Fue Tales de Mileto quien hizo suya esta idea al proclamar que era el agua la substancia primigenia, en consonancia con el pensamiento griego que comenzaba a edificarse por entonces en este importante centro marítimo, lleno de actividad comercial y cruce de culturas.

*“El agua es la primitiva razón material de todas las cosas.”<sup>2</sup>*

Todo lo que conocemos de este pensador es a través de los comentarios y escritos de otros sabios que fueron recogiendo las que se cree fueron sus palabras y sus ideas. El material es bien escaso pero fundamental, no sólo para el conjunto de la historia del pensamiento humano, sino para el tema que nos ocupa de la relación entre la imagen y el conocimiento. Probablemente, este sabio también rescató una técnica egipcia que servía para calcular la altura de las pirámides a partir de la sombra que proyectaban sobre el terreno. Se dice que Tales esperó a que su propia sombra igualara la altura de su cuerpo para determinar la de estas grandes edificaciones. La sombra es una fuente inagotable de conocimiento. Newton, de joven, tenía la afición de construir relojes solares aprovechando la proyección de sombras por cualquier objeto o motivo presente en su casa<sup>3</sup>. La escala de grises, que reproduce una emulsión fotográfica, no es más que el reflejo de las luces y sombras proyectadas por los objetos<sup>4</sup>. El movimiento de los astros, los eclipses, la duración de las horas y de los días, la construcción de teoremas geométricos, etc., son fenómenos que comenzaron a ser estudiados y comprendidos a partir de las sombras de las piedras, del gnomon, de los propios objetos. Por algo será que gnomon, el pivote del reloj solar que nos dice con su sombra la hora del día, significa conocimiento. (Fig. 2.1).

Tales de Mileto vivió probablemente entre el último tercio del siglo VII a.C. y la primera mitad del siglo siguiente (624-550 a. C). Se sabe que viajó por Egipto y Caldea, donde adquirió conocimientos científicos de esos pueblos. Puede que a partir del estudio del gnomon ideara el teorema de los triángulos semejantes, con el que llegó a las mismas conclusiones que los antiguos egipcios para el cálculo de



*Fig. 2.1. Cuadrante solar con gnomon. Siglo I d. C. Egipto*

la altura de las pirámides. Y también se sabe que fue capaz de predecir el eclipse de sol ocurrido el 28 de mayo de 585 a.C. La importancia de este sabio va más allá de estos descubrimientos, porque en su defensa del agua como elemento originario de todas las cosas, o incluso cuando afirmó, no muy certeramente, que la tierra flotaba sobre ella, está ya presente el germen de un pensamiento nuevo, liberador, consistente en una búsqueda de racionalización de las fuentes del conocimiento humano, y en desligar el saber del mito y la superstición. Esta idea del agua no es, sin embargo, algo genuino de este pensador; era una creencia que ya se respiraba en la época, como se desprende de algunos pasajes en la obra de Homero<sup>5</sup>, y en el pensamiento de la escuela de los físicos jónicos, movimiento que parte del mismo Tales y que representa el origen del pensamiento científico en Occidente.

Y el ámbar se sumó a la sombra. Se atribuye también a este sabio el descubrimiento de la electricidad por frotamiento del ámbar y la descripción de los poderes del magnetismo a partir de su estudio de los imanes, aportando con ello uno de los primeros datos con los que se empieza a construir la historia de la electricidad, tan importante en nuestra materia. Probablemente, se trata de la constatación de un fenómeno observado por la humanidad desde tiempos inmemoriales. Pero, eso sí, la fuerza de atracción que producen los imanes sobre el hierro le sirvió para defender una especie de hilozoísmo en torno a la materia, que consideró provista de un alma.

*Parece que también Tales, -a juzgar por lo que de él se recuerda- supuso que el alma es un principio motor si es que afirmó que el imán posee alma puesto que mueve al hierro .<sup>6</sup>*

Esta equiparación de la fuerza de atracción del imán con el alma denota, a pesar de la elección de un término tan espiritual y metafísico, un afán por construir una visión más racionalista de los fenómenos de la naturaleza. La materia es vista como un organismo vivo, se identifica con la vida, no existen diferencias, pues, entre lo animado y lo inanimado. Ese es el secreto del imán, atrae el hierro porque comparte un mismo principio con él, que para entonces lo denomina alma. Aunque parezca un contrasentido, se trata de una concepción muy próxima a la física de nuestros días. Como cuando afirmó que “*Todo está lleno de dioses*”, idea que debió hacer mella en el conjunto del pensamiento griego, a juzgar por los comentarios de Platón<sup>7</sup>, o por hacerla suya el propio Aristóteles<sup>8</sup>. Tal vez, la terminología utilizada pueda resultar engañosa a los ojos de hoy, pero son ideas sobre la estructura y el origen de la materia que sentaron las bases del discurso científico de la época. A lo más, se deja entrever en estas máximas una influencia de las religiones y del pensamiento orientales, proclives a la idea del absoluto y a un panteísmo naturalista, conocidos con toda seguridad por el sabio de Mileto. La tendencia a creer que el universo se forma a partir de un elemento material como es el agua - o de otros elementos como el fuego, la tierra y el aire, como defenderían más tarde sus discípulos, los físicos jónicos- rompió con una tradición de miles de años, ligada a la religión, a las profecías, a los tabúes, que venía interpretando el universo desde un punto de vista animista o partiendo de la existencia de deidades de diversa índole.



Y tanto la sombra como el ámbar y el imán, coincidentes en la obra de este pensador, se encuentran estrechamente ligados con la materia de estas páginas. Porque la imagen fotográfica, tanto química como electrónica, se debe en gran medida a estos fenómenos; y porque la perspectiva que este sabio adoptó en su estudio de la naturaleza, abriendo un cisma en la interpretación que los filósofos y científicos harían en un futuro sobre el origen del conocimiento humano, marca la pauta de esta andadura. Esta división de pareceres entre aquellos que abogan por la razón, el pensar o la mente como vía directa de adquisición de conocimiento, y aquellos otros que defienden los sentidos y la experiencia para los mismos fines, conforma el marco conceptual donde se puede ser emplazado el fenómeno de la imagen tecnológica. Tanto una imagen como otra participan de lleno en esta polémica. Ambas son productos de instrumentos que potencian las capacidades de la observación humana y amplían nuestra experiencia; pero presentan, a un mismo tiempo, limitaciones a este método experimental, al colocar filtros infranqueables a nuestros sentidos, al engañarnos a veces, o al decirnos qué debemos ver, abriendo las puertas a la especulación, a la hipótesis, a las suposiciones que permite la teoría. Ese es el mismo dilema que domina la historia de la ciencia.

Las sombras de la fotografía clásica se manifiestan estáticas una vez fijadas en las emulsiones; pero este resultado producido por la fotoquímica es hasta cierto punto controlable; intervienen en él múltiples variables técnicas y humanas que lo hacen impredecible, otorgando un lugar destacado a la contingencia y al azar. Es cierto, por otro lado, que la ciencia ha sabido aprovechar con creces este resultado mudo e inmóvil, dado que durante muchos años ha preferido esa estaticidad, ese momento atrapado, fijo e impertérrito, por ser susceptible de ser medido y escudriñado hasta sus más ínfimos detalles. De hecho, la misma cronofotografía o la fotografía aplicada al estudio de los fenómenos de alta velocidad han preferido el análisis particular de cada uno de los fotogramas captados, antes que tener que enfrentarse a la proyección de inabarcables tiras de película. Por el contrario, las imágenes que procura la electricidad son movibles, imparables, titilan a la velocidad de la luz en las pantallas de fósforo de los tubos de imagen y son tan difíciles de atrapar como los electrones de que están formadas. Se alimentan de ese principio motor de las cosas, de esa alma inquieta de la que nos habla Tales. Ahora se las conoce muy bien, se sabe cómo están estructuradas, cómo se lleva a cabo el proceso de su construcción, cómo se almacenan, y también cómo se transmiten. La ciencia de la electricidad, desde los tiempos del sabio de Mileto, ha ido madurando sin cesar hasta formar un bagaje de conocimientos único en la historia de la humanidad. Un conocimiento basado en el dominio de sus partículas constitutivas y de la energía que produce, lo que ha posibilitado la construcción de una tecnología sin precedentes, que nos envuelve y condiciona y que incluye, como un producto más, la imagen electrónica.

En cierta manera, esta diferencia de niveles o de grados de control sobre los procesos que participan en la formación de ambas imágenes hace que de ellas deriven instrumentos científicos diferentes, que a su vez originan conocimientos también diferentes. Las sombras de las piedras gigantes de Stonehenge o las del asfalto grabado en Hiroshima (Fig. 2.2 y 2.3) nos vienen dadas como testigos impasibles de los fenómenos ocurridos en el tiempo; por el contrario, las imágenes de naturaleza electrónica fluctúan, y cambian a cada instante y se resisten a ser atrapadas; de hecho, durante largos años era la fotografía la que retrataba sus pantallas parpadeantes para fijar de una vez el objeto de estudio. La fugacidad es parte de su naturaleza, están *repletas de dioses*. Incluso la imagen electrónica digital, que las trasciende y supera a ambas, muestra algo de esta



**Fig. 2.2.**  
*Construcciones megalíticas de Stonehenge.*



*Fig. 2.3. Sombras petrificadas en el asfalto de Hiroshima, 1945*

volatilidad en su capacidad de ser manipulada, construida, interpretada, modificada, simulada y hecha a medida, una cualidad que le viene dada por ese control refinado del que hablábamos sobre la luz y la energía eléctrica. La ciencia de la imagen tecnológica actual, como la ciencia en general, ha llegado a donde ha llegado eminentemente por haberse acercado a vislumbrar la estructura íntima de la materia. Genes, átomos, electrones, fotones, bits, pulsos, etc., están en la base de los grandes avances científicos y de la construcción de la tecnología que nos rodea. Los griegos, y en particular los atomistas, pese a no disponer de una instrumentación científica refinada y precisa, intuyeron que ése era el camino para ampliar el conocimiento. A falta de instrumentos de observación que les pudieran enseñar el trazado de los átomos y de las partículas, la estructura de los cuerpos, los momentos fugaces e imperceptibles de los objetos en movimiento, los astros tan lejanos, la disposición geométrica en la que se presentan las partes de las células que dan lugar a la vida, etc., siguieron el sabio camino de la imaginación y de la representación abstracta de ese mundo secreto y oculto a sus miradas. A este esfuerzo titánico de los filósofos griegos se debe el desarrollo de su filosofía, su precisión en la delimitación de conceptos y su profundidad de abstracción, de la que aún nos alimentamos y a la que siempre recurrimos.

Pero la abstracción no se alimenta por sí sola o en el espacio vacío, se construye sobre un mundo real repleto de materia e historia. A veces uno se olvida de dónde nacen las sombras. En la caverna de Platón, el *hombre de oro*, como gustaba llamarle el atomista Epicuro, el mundo es pura apariencia, sombras proyectadas en un muro que nos aprisiona. En este habitáculo los sentidos nos engañan, la observación de los fenómenos es cierta sólo hasta cierto punto. Veinticinco siglos más tarde, el físico cuántico Werner Heisenberg cuestionó también el valor de las observaciones hechas sobre fotografías que mostraban el trazado que las partículas atómicas dejaban en la cámara de niebla, hecho que le sirvió de paso para formular sus afamadas relaciones de indeterminación. Lo importante para esta escuela de filosofía son las ideas, las formas que el espíritu comparte con la naturaleza; de aquí, su apasionamiento por la geometría pura y abstracta y por las matemáticas. Según ellos, el conocimiento viene dado por el descubrimiento de estas relaciones formales que están presentes en la naturaleza y en el interior de nosotros mismos, que vamos desvelando poco a poco. Al fin y al cabo, todos somos uno y una misma cosa, partes de un espíritu universal, de una Idea, de Dios. Qué diferente es esta visión de la que veíamos en Tales, y de la que veremos posteriormente en los atomistas. El principio unificador, en este caso, es también denominado alma, pero asemejado a energía, a vida, a la fuerza que ejerce el imán sobre los cuerpos, a los átomos que presentará Demócrito para explicar la composición de las cosas. Las sombras del gnomon y las sombras de la caverna platónica suponen dos formas antagónicas de interpretar el origen del conocimiento. En Platón y Demócrito ya encontramos dos modelos de entender el mundo que prevalecen hasta nuestros días y dos teorías del conocimiento con una fuerte repercusión en el quehacer científico.

Adelantándonos a nuestras conclusiones, insistiremos en que la abstracción no es ingenua, ni se construye en el aire; comprobamos, incluso, que no está desligada de la historia, de lo político o de la ética imperante. El idealismo platónico ha sido un recurso reiterado a lo largo de la historia para la justificación de cierto tipo de poder político, religioso y moral sustentado en principios como la separación entre cuerpo y alma, entre hombres libres y esclavos -los hombres de



hierro, plata y oro de Platón- entre mensajeros de Dios y poseídos y herejes. Y ha sido además fuente de inspiración de un estilo de imagen idealizadora del mundo y de nosotros mismos, que encontramos tanto en la pintura y la escultura como en la fotografía y el cine de nuestros días. Pero también vemos repetirse en la historia el determinismo implacable del universo atómico de Demócrito y de otros científicos y pensadores posteriores, inspirando un dogmatismo exacerbado, tanto en lo político como en lo científico, y sirviendo a concepciones sobre el mundo extremadamente mecanicistas y reduccionistas. La ciencia de hoy ha aprendido ambas lecciones y ha optado por reconocer al azar, a la probabilidad y al indeterminismo un papel importante en sus teorías. Tal vez no estaría de más recordar la defensa que hizo Epicuro de la caída libre de los átomos, contraviniendo las teorías de Demócrito. Fue también una abstracción, fruto de la imaginación, una *imagen física*, como la llamarían los científicos actuales, pero necesaria para entender la naturaleza provista de libertad, especialmente la de los hombres.

La ciencia moderna sigue debatiéndose entre modelos intuitivos y abstractos. Los primeros, hace ya más de un siglo, que se han decantado por entender los fenómenos energéticos, especialmente los de la termodinámica y los del electromagnetismo, de acuerdo a imágenes próximas a las de los atomistas griegos. La energía, como la que se transforma de un estado a otro en los procesos fotográficos cuando la luz incide en las superficies fotosensibles, se lleva a cabo en saltos, en *quantos*, en intervalos que necesitan sobrepasar cierto umbral para que se active el siguiente nivel energético, y no de forma continua como siempre se había creído. El desarrollo de la ciencia a lo largo de los siglos se ha alimentado de esta fabricación de imágenes abstractas, físicas, sobre las que se articulan sus leyes y principios fundamentales. Cada cierto tiempo, nuevas observaciones y nuevos experimentos las hacen tambalear, y se iza una nueva más general e integradora. Es el continuo devenir de la deducción y la inducción, los dos procedimientos básicos utilizados en ciencia para establecer principios y poder prever los acontecimientos venideros. Los atomistas griegos idearon su propia visión imaginaria a partir de la creación de un universo formado por esas diminutas partículas llamadas átomos, que, si bien era inalcanzable por los ojos y la instrumentación de la época, les sirvió para levantar un modelo teórico e interpretativo de la naturaleza. Contra esta visión atómica de la realidad se levantaron muchos detractores, Platón entre otros. A muchos de ellos les angustiaba un antiguo dilema: cómo entender la unicidad de los objetos de la naturaleza, cómo poder ser a un mismo tiempo uno, -por ejemplo, una piedra o un árbol-, y ser en realidad otro distinto, a medida que transcurre el tiempo. Como el río de Heráclito, siempre el mismo río, pero diferente en cada momento. Estas disquisiciones les llevaron a defender la negación de todo cambio y a postular, como Parménides, la inmutabilidad de las cosas. Para este filósofo, la transformación de las cosas son ilusiones de nuestros sentidos: lo que es lo es siempre; en su opinión, lo único existente, original y genuino, es lo Uno, por naturaleza indivisible.

Es necesario recordar en este momento que esta lucha entre los partidarios de la continuidad, por un lado, y los seguidores de la discontinuidad, por otro, como procesos que rigen los fenómenos de la naturaleza, no es algo que pertenezca exclusivamente al pasado y a los griegos clásicos. La física moderna ha debatido en profundidad estas cuestiones al plantearse la doble naturaleza: como ondas y partículas, de la luz y la materia<sup>9</sup>, fenómeno por lo demás íntimamente relacionado con los procesos de formación de imagen tecnológica. En nuestros días contamos con un modelo interpretativo de esta doble existencia, respaldado por observaciones experimentales, muchas de ellas fotográficas, que entiende que tanto la luz como la materia se propagan y manifiestan en forma de ondas y partículas a un mismo tiempo. La paradoja radica en que las ondas son entendidas

como un fenómeno continuo y homogéneo, que, a su vez, contiene átomos en su interior, corpúsculos discretos, distribuidos de una forma determinada. Por tanto, continuidad y discontinuidad se producen al mismo tiempo. Al final se ha llegado a una solución de compromiso que consiste en argumentar que esta distribución de los átomos en el seno de las ondas se hace a su vez de forma discreta, con lo que las ondas dejarían de ser un fenómeno continuo. Sería imposible localizar un átomo en el seno de una onda o definir su movimiento posible, tan solo podríamos definir determinados intervalos donde sabemos que están y se mueven, y esto nos fuerza a una representación estadística de los hechos. Es ésta la visión con la que comprendemos en la actualidad el comportamiento de los fenómenos físicos, entre ellos los de los fotones y electrones que participan en la creación de imágenes fotográficas de toda índole.

La presencia del pensamiento griego en nuestros días no termina ahí. Los atomistas, para dar alcance a la tortuga de Zenón, que duplicaba una y otra vez la distancia que le separaba de Aquiles, su perseguidor, recurriendo al artificio de dividir hasta el infinito esa misma distancia -algo matemáticamente posible-, idearon una nueva imagen interpretativa de los hechos: la nada o el vacío. El vacío fue enunciado para defender esta discontinuidad de las cosas, para argumentar que era posible lo *uno* y lo *múltiple*, el *ser* y el *llegar a ser*, todo a un mismo tiempo. El cambio y el movimiento de las cosas, fenómenos que se constatan por los sentidos -"heraldos de la verdad"<sup>10</sup> en palabras de Epicuro- tenían que ser comprendidos trascendiendo la unidad y la exclusividad de lo *uno*, que nos condicionan a una visión del mundo caracterizada por la inmutabilidad de las cosas. En definitiva, fue preciso acudir al vacío, a la nada, antítesis productoras de cambios y mutaciones en lo existente, para explicar el movimiento. En la segunda mitad del siglo V antes de nuestra era, con Leucipo y Demócrito se construyó una teoría física, que entendió el universo y la materia como algo constituido de diminutas e infinitas partículas inobservables, unidas entre sí por el vacío. Esta visión fue defendida y reinterpretada por Epicuro en el siglo III, en oposición a la interpretación platónica de la naturaleza, modelo imperante en aquellos momentos.

*Es asimismo verdad que el universo está compuesto de cuerpos y de vacío. De la existencia de los cuerpos nos da testimonio la sensación, en la que es necesario que se apoye el razonamiento al conjeturar acerca de lo desconocido, como ya he dicho antes. Si no existiera eso que nosotros llamamos vacío, y espacio, y sustancia intangible, los cuerpos no tendrían ni donde existir ni por donde moverse, del modo como vemos que efectivamente se mueven.<sup>11</sup>*

Se trata de dos concepciones diametralmente opuestas, cuyas ondas expansivas llegan hasta nuestros días, y que toman señas de diferenciación muy precisas en torno a la interpretación de la formación de las imágenes en nuestros sentidos. Si para el *hombre áureo*, la proyección de los rayos luminosos procedentes de nuestros ojos y dirigidos hacia los objetos era la fuente de creación de las imágenes, para el hedonista Epicuro, éstas se debían a emanaciones procedentes de los objetos. Esta doble direccionalidad se encuentra en la base de las distintas filosofías materialistas e idealistas que se han producido a lo largo de la historia, representado un eje sobre el que se han ido posicionado las distintas teorías del conocimiento.

Las teorías, como vemos, ocupan un lugar intermedio entre la experimentación y la especulación. Se alimentan de los hechos, pero su formulación cobra sentido si predicen nuevas observaciones y nuevos acontecimientos. Las matemáticas, en este sentido, ofrecen grandes garantías de éxito, son muy buenas cartas en este

juego predictivo. Con el tiempo, el vacío, de ser una entidad puramente abstracta, inobservable por nuestros sentidos, cobró visos de realidad y se convirtió en un fenómeno físico de gran importancia en el desarrollo de la ciencia. Y a este vacío concreto y físico se le unió una invención matemática, *alter ego* de esa nada y con igual o mayor trascendencia en el futuro de la humanidad: el cero. El cero y el vacío han desempeñado un papel de primera importancia en la constitución de la imagen electrónica de nuestros días.

### ***2.1.1. El cero y el vacío.***

Tanto el número como la letra -símbolos arbitrarios de representación y fundamento de dos de las actividades más importantes de los seres humanos, como son su capacidad para contar o calcular, y para poder escribir o registrar lo que se habla- nacen de dos hechos concretos y materiales: del guijarro y del dibujo de los objetos. Los números y el alfabeto se deben a un proceso de decantación producido a lo largo de los siglos, en el que la capacidad de abstracción humana ha desempeñado un papel preponderante. Los números nacen de la necesidad de contar - ganado, trigo o muertos en la batalla- y de las primeras formas de hacerlo, por medio de guijarros, huesos, o marcas hechas en la madera o en otros tipos de superficies u objetos. No debemos olvidar que cálculo significa piedra. Por su parte, las letras tienen su origen en los ideogramas y en otras clases de representaciones analógicas de los objetos, que al fin y al cabo redundaron en imágenes. El tiempo se ha encargado de depurar estas realidades en símbolos alfanuméricos para facilitar tanto las operaciones matemáticas como la comunicación escrita. En este proceso de transformación o de depuración de dos hechos originalmente concretos en una simbología abstracta, artificial y arbitraria, es en el que se apoya también todo el desarrollo científico y técnico de nuestra actual civilización. Y existe la doble tendencia de ligar esta simbología, bien a los hechos concretos de la naturaleza, bien a un mundo inmaterial, formado de ideas, tal como sucede, en el terreno del pensamiento, entre las concepciones más intuitivas y las más abstractas. Es conocida la asociación que pitagóricos y platónicos establecieron entre los números y lo divino, considerándolos por esta razón la vía más alta y directa para la adquisición de conocimiento. Y existe una abundante simbología en las religiones, testimonio de una estrecha relación entre los números, los dioses, y las representaciones que se hacen de éstos, llena de mensajes crípticos e irresolubles, que sólo los sacerdotes, los profetas o los mensajeros pueden interpretar. Los dioses han sido representados por números o combinaciones de éstos desde las primeras culturas y religiones, ya sean las del lejano oriente, Mesopotamia, o las más cercanas a la cuenca del mediterráneo, como la hebrea, o sus derivadas, la cristiana y la musulmana. En este orden de cosas, no es sorprendente comprobar cómo los números han estado históricamente asociados a la superstición, a lo esotérico o a lo cabalístico.<sup>12</sup>

En cuanto a los orígenes del alfabeto, encontramos, en primer lugar, jeroglíficos y pictogramas que, como en el caso de los egipcios, fueron considerados expresión directa de la palabra de los dioses; a estas primeras escrituras se les fueron uniendo otras formas de ideogramas pertenecientes a otras culturas, que, con el paso del tiempo y por necesidades prácticas, fueron transformándose en sistemas de grafía más esquemáticos, formales y simples, como es el caso de la escritura cuneiforme. De estos trazos sobre planchas de arcilla derivaron paulatinamente los diferentes signos de los actuales alfabetos. Probablemente fueron los fenicios los primeros en difundir las primeras formas de alfabeto escrito, hacia el segundo milenio antes de Cristo. Sus necesidades mercantiles y sus continuos viajes e intercambios con otros pueblos favorecieron la aparición de las primeras denominaciones de las cifras y de los números y de los distintos tipos de cálculo.

En ambos casos, tanto en los números como en las letras, se produjo una dualidad entre abstracción e imagen. De dos realidades sensoriales, como eran la observación de las marcas y los objetos con los que se cuenta, y de los estímulos acústicos que producen las palabras habladas que conforman las distintas lenguas, se llegó a la formación de dos sistemas de signos que mantienen una estrecha relación con lo visual, pero que conforman a la vez una herramienta eminentemente abstracta. Esta dualidad entre números y palabras e imágenes la encontraremos a lo largo de la historia, bien bajo la forma de una complementariedad ejemplar, bien a través del enfrentamiento, velado en algunas ocasiones, o encarnizado y vivo en otras.

*En cualquier caso, si el nacimiento histórico del **Homo pictor** se produjo hace poco más de 30.000 años, su tardía aparición en relación con el **Homo loquens** significa que el hombre ha vivido con imágenes, aproximadamente, sólo una séptima parte de su existencia, a pesar de que hoy las imágenes figurativas nos parezcan tan obvias, banales, omnipresentes, y sobre todo permanentes, en nuestro entorno.*<sup>13</sup>

Si partimos del supuesto de que las facultades de representación y de abstracción son consustanciales al ser humano, nos ahorraremos el esfuerzo de determinar, cronológicamente, qué tipo de *homo* fue primero, si el *pictórico* o el *hablante*. Las palabras y los números nos llevan rápidamente a la consideración de las esencias de las cosas, a la *mesedad* de Platón, o cualidad común a toda mesa; algo que Diógenes *el cínico* no pudo ver por ninguna parte. Por el contrario, la imagen merodea alrededor de las cosas, deleitándose en sus apariencias, acariciando sus superficies. Hasta qué punto el pensamiento humano se compone de estos dos elementos, en qué medida se interrelacionan, o qué funciones cumplen cada uno de ellos en el interior de nuestros cerebros, es un campo extraordinario de investigación que afecta hoy día a diferentes ramas del conocimiento. Hasta hace muy poco tiempo se tendía a pensar que el discurso mental y la inteligencia se apoyaban preferentemente en la palabra, en el logos, y por extensión en los números; sin embargo, recientemente se tiende a situar la representación mental, la imaginación, la memoria, o todo tipo de visualización interna de los fenómenos en un lugar de suma importancia en la construcción de las ideas. El desarrollo de las distintas *imágenes físicas* o interpretaciones globales de los fenómenos de la naturaleza, que se ha producido con especial fuerza desde el Renacimiento, es una clara muestra de hasta qué punto el universo de las representaciones desempeña un papel crucial en la historia de la ciencia y del pensamiento. En este contexto, la aparición de la imagen tecnológica en los dos últimos siglos de nuestra historia, como instrumento de observación, de visualización y de simulación icónica de fenómenos, desempeña un papel de extraordinario valor.

*En las ciencias del último siglo y medio, lo pictórico y lo lógico han estado encaramados de forma inestable, cada cual agarrado en todo momento del abismo del otro.*<sup>14</sup>

Si la palabra es, en sí misma, divina, como el número -tan sólo hay que recordar el caso de la simbología cristiana, en la que el *Verbo* es la pura representación de la palabra de Dios; es más, es el hijo de Dios, o ser por el que la máxima deidad, el Padre, expresa su esencia y la plenitud de su conocimiento-, la imagen, por el contrario, suele ser la profanación del mundo espiritual, la esencia del ídolo, el origen de la tentación y el pecado, el traspaso de la mirada hacia las zonas



prohibidas. La *escena primaria*, en la teoría psicoanalítica de Sigmund Freud, simboliza el hecho real o imaginario de la representación que el infante se hace del coito parental, origen de su complejo de Edipo. De este dilema entre el culto y la profanación que puede sugerir la imagen a un mismo tiempo, surge la creencia, en religiones como el judaísmo o el Islam, de que Dios es un ser irrepresentable, huérfano de toda imagen. Y también es responsable, durante los siglos VIII y IX del imperio bizantino, de una crisis sin precedentes en el seno de la iglesia ortodoxa en torno a los iconoclastas. Lo *absoluto* es un concepto que se resiste a ser representado. En el taoísmo, la *Gran Imagen* es precisamente la ausencia de ella, una representación del estado de no existencia, de vacuidad, de liberación de todo deseo, virtud última que equivale al nirvana del hinduismo y del budismo. La *shunyata*, o filosofía de la vacuidad, presente en la mayoría de las religiones orientales y anterior al cero aritmético, se encuentra probablemente en el origen de esta cifra, que representa el grado más alto de abstracción conseguido dentro de los números. No era de extrañar, por tanto, que la invención de esta poderosa cifra se produjera en la India, donde se distinguen hasta veinticinco tipos diferentes de *shunya*, o formas de vacuidad.

### 2.1.2. *Uno basta para sacar todo de nada*

Para producirse este desarrollo numérico durante siglos y siglos, parece como si hubiera sido necesario que el número se liberara, por un proceso de abstracción, del objeto que se encontraba en su origen o de toda imagen que lo recordase. El número parece exigir ser él mismo, tener autonomía respecto de las cosas y pertenecer a un mundo propio, autosuficiente, tal como la ciencia en la que queda enmarcado: las matemáticas. El primer paso de este proceso lo encontramos en la transformación del número cardinal en ordinal, de la simple muesca que representa la unidad, o de la agrupación de estas marcas como procedimiento rudimentario para sumar o restar a base de *unos*, al número como símbolo, con un signo atribuido y adoptando un orden y un sentido de recurrencia.

*Todo lo que precede demuestra suficientemente que para que una notación numérica esté bien adaptada a la práctica de las operaciones escritas no sólo tiene que reposar sobre el principio de posición, sino poseer también unas cifras significativas distintas que correspondan a unos signos gráficos desligados de toda intuición visual directa. Dicho de otra manera, la estructura gráfica de sus signos numéricos debe ser idéntica a la de las cifras de nuestra numeración escrita actual, donde un "9", por ejemplo, no está compuesto de nueve puntos o barras, sino que corresponde a un signo convencional desligado de toda ideografía.<sup>15</sup>*

Siglos más tarde, los símbolos se enredaron consigo mismos, una vez que Descartes propuso expandir el sentido de los números mediante el uso de las letras, tal como había sugerido anteriormente su compatriota Francois Viète. A fin de racionalizar aún más el cálculo y el álgebra, dio una vuelta de tuerca más a este proceso de abstracción en torno a las cifras. La notación simbólica literal que reemplaza los datos numéricos por las primeras letras del alfabeto (*a, b, c, d*, etc.) y las incógnitas por las últimas (*x, y, y z*) da un nuevo empuje al álgebra que, ayudada también por la incorporación del cero, cobrará el sentido moderno que llega hasta nuestros días. Si los números habían sustituido a los guijarros y a los huesos, las letras sustituyeron a los números. Para Leibniz y tantos otros matemáticos fue una verdadera liberación ver cómo el álgebra se convertía, de esta forma, en un lenguaje lógico y matemático universal, preciso y perfecto.

*Este método permite ahorrar imaginación y espíritu para usos más provechosos. Nos faculta para razonamientos complicados sustituyendo objetos por caracteres, dejando así más espacio a la imaginación.*<sup>16</sup>

La instrumentación matemática básica, tan obvia ahora, no surgió por arte de birlibirloque, sino que se fraguó a lo largo de miles de siglos. El cero, sin ir más lejos, es una invención que se produce en varias culturas a la vez, de forma independiente y en siglos distintos. Para su concepción fue necesario que los sistemas numéricos existentes desarrollaran previamente la numeración posicional, es decir, que los números adquirieran uno u otro valor en función de su posición en el conjunto de la cifra. Dependiendo de si el sistema numérico era de base diez, doce o sesenta, etc., un número en particular adquiriría un valor determinado dependiendo del lugar que ocupara en el conjunto de la cifra. Los babilonios fueron los primeros en reparar en este hecho hacia principios del segundo milenio a. C. Luego los chinos lo lograron poco antes del inicio de la era cristiana. Les siguieron los astrónomos mayas, entre los siglos III y IV de nuestra era; y por último los matemáticos indios, en torno al siglo V d. C, lograron darle su valor y sentido modernos al asociarla al cero. Desde nuestra perspectiva actual, es sorprendente que la invención de la numeración posicional sólo se produjera en cuatro pueblos del planeta a lo largo de la historia, o de que su aparición en el mundo occidental tuviera que esperar hasta finales del siglo X, cuando los árabes la trajeron desde la India, junto al nuevo cero. Porque el cero fue conocido desde tiempos remotos por estas culturas y por otras muchas que lo asociaron a la nada, al vacío, al espacio, al cielo, al éter, etc., pero nunca fue suficientemente comprendido en el ámbito de las matemáticas, dentro de su posición en la cifra, hasta que los indios le dieron su dimensión actual.

*Por el contrario, desde que se comenzó a aplicar regularmente el principio de posición, llegó un momento en que se hizo necesario disponer de un signo gráfico especial que representara las unidades que faltaban: exigido así, por un uso estricto y regular de esta regla, el descubrimiento del cero ha marcado la etapa decisiva de una evolución sin la que no se podría imaginar el progreso de las matemáticas, las ciencias y las técnicas modernas.*<sup>17</sup>

Para dar a entender las decenas o centenas enteras, sin unidades posteriores, hacía falta una cifra que significara nada, el vacío, un signo que estuviera como a la espera de cobrar su valor en el momento indicado; de ahí surgió la necesidad del cero. De autor desconocido, insisto, fue traído por los árabes a Europa a finales del siglo X, junto al resto de las cifras árabes que utilizamos. Fue probablemente *Al Juwarizmi*, el creador del álgebra, quien nos brindó en su *Tratado de la adición y la sustracción* de 810, el testimonio más antiguo acerca de la existencia del sistema numérico indio.<sup>18</sup> Durante los siglos VIII al XIII, siglos de apogeo de la cultura islámica, las numerosas traducciones que se hicieron de los clásicos griegos y de sabios indios, así como la difusión de los adelantos científico-técnicos de culturas como la china, contribuyeron decisivamente a que Europa despertara ante una serie de invenciones que con el tiempo haría suyas y que ayudarían a conformar todo el desarrollo científico-técnico de los siglos venideros. Al ver, hoy día, la tremenda aceleración con la que se ha producido este proceso, en apenas cuatro siglos, no deja de sorprender que transcurrieran más de cinco siglos desde la supuesta invención del cero en la India hasta que fue dado a conocer en Europa por los sabios árabes.

*Así el descubrimiento del cero y la numeración decimal de posición tuvo lugar, seguramente, a mediados de la época del imperio de los Gupta, dinastía que reinó en todo el valle del Ganges y sus afluentes desde aproximadamente el año 240 hasta el año 535, periodo denominado "clásico".<sup>19</sup>*

Esto demuestra cómo a veces los inventos deben esperar el momento que las sociedades les otorgan, hasta que las condiciones socioeconómicas, educativas y culturales lo permiten. El desarrollo de las nuevas ciudades, de las nuevas rutas comerciales por el mundo, el nacimiento de una nueva clase social dedicada a las finanzas, a los negocios, a la explotación de nuevas fuentes de riqueza, etc., hechos que van a confluir en la cultura y el periodo histórico que conocemos como Renacimiento, iban a demandar nuevas herramientas matemáticas, como el cero, capaces de manejar esa nueva realidad más dinámica y compleja. La perspectiva, la imprenta, el reloj o el cañón son inventos propios de esta época. La difusión del conocimiento entre capas sociales más extensas, y hasta entonces apartadas del saber, fue una necesidad del incipiente capitalismo. Como señala G. Ifrah, la notación numérica, junto a la fijación de la base decimal y la incorporación del cero, consiguieron una democratización del cálculo, actividad que hasta entonces había recaído en la clase privilegiada de calculadores profesionales, con lo que a partir de entonces una parte de la población, aunque sin demasiada pericia aritmética, pudo acceder a realizar cálculos numéricos.<sup>20</sup>

Este proceso cultural coincide con un fenómeno único en el ámbito de las ciencias, que es propio de esta época, y que consistió en el entronamiento de las matemáticas como parte fundamental del método científico. Galileo nos dice que la naturaleza nos habla en lenguaje matemático y Descartes aplica el álgebra al desarrollo de su Geometría Analítica, con la que nacerá una de las herramientas de mayor trascendencia en la historia de la ciencia venidera. La representación en un plano de coordenadas de las distintas variables que se estudian, de sus figuras y de sus movimientos, se convierte en un instrumento de visualización abstracta cuya utilidad e importancia no cesa hasta nuestros días. Los gráficos "*hablan a los ojos*"<sup>21</sup>. Y el cálculo numérico, por su parte, es una disciplina que sufre un desarrollado inusitado, avivado por una fuerte demanda social, que va a forzar a la comunidad de científicos a buscar nuevas fórmulas e instrumentos que faciliten este tipo de operaciones. A partir del siglo XVI se producirá un gran esfuerzo intelectual y experimental encaminado a la construcción tanto de máquinas como de procedimientos matemático-lógicos que faciliten las tareas de cálculo que requiere la ciencia y la sociedad del momento. La invención de los logaritmos por John Napier a principios del siglo XVII, y la construcción, años más tarde, de los primeros artilugios y máquinas calculadoras por el propio Napier, Schikard, Pascal y Leibniz, supone el inicio de un proceso de paulatina automatización de las operaciones lógico-matemáticas presentes en numerosos ámbitos del saber, de las ciencias aplicadas y de la tecnología, siendo éste un proceso que llega, sin señales de remisión, hasta nuestros días. En estas primeras máquinas calculadoras encontramos ya un esquema operativo que se mantendrá vigente hasta la configuración de los ordenadores actuales, siendo de especial relevancia, para nuestros fines, la forma en que estos primeros autómatas representan visualmente el resultado de las operaciones. La sobriedad de los datos numéricos mostrados por los artilugios mecánicos de Pascal o Leibniz contrasta con la ambigüedad y complejidad de modelos lógicos más pretenciosos y esotéricos, como los incluidos en el *Ars Magna* de Ramón Llull (hacia 1275)<sup>22</sup>. Dos culturas bien distintas, la moderna y la del medievo, quedan claramente manifiestas en estos modelos que, de una forma u otra, estarán presentes en el desarrollo de la informática de nuestros días (Fig. 2.4., 2.5., y 2.6.). Con Llull se inicia una escuela de pensamiento que se caracteriza por el intento de sistematizar, ordenar y representar los

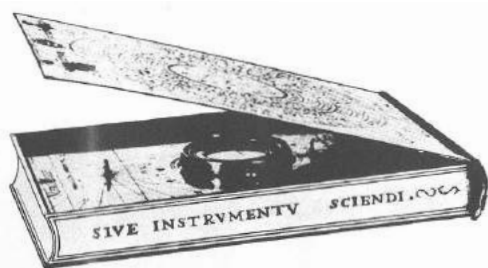


Fig. 2.4. Gnomon o cuadrante solar con figuras pertenecientes a Ramón Llull. Siglo XVI. 1593.

procesos lógicos mediante símbolos, artilugios mecánicos, diagramas o figuras geométricas. Con las calculadoras comienza un periodo de aplicación del saber y de las destrezas provenientes de la mecánica al procesamiento automático de operaciones matemáticas. Ambas dimensiones confluirán en el siglo XX gracias a la aparición de la tecnología electrónica, que será la que haga posible el despegue de los ordenadores modernos, o de máquinas autómatas destinadas tanto al cálculo numérico

como al procesamiento de información susceptible de ser tratada lógica y numéricamente. La pixelización de la imagen, unida a la conversión de la luz en impulsos eléctricos, ha hecho posible aplicar esta tecnología informática a la creación de la imagen electrónica digital. Pero para ello fue necesario que el cálculo numérico pudiera ser realizado por estos nuevos ingenios electrónicos de una forma práctica y sencilla, posible gracias a la numeración de base dos, o cálculo regido por un sistema binario conformado exclusivamente por ceros y unos.



Fig. 2.5. Pascalina. Blaise Pascal. 1645.

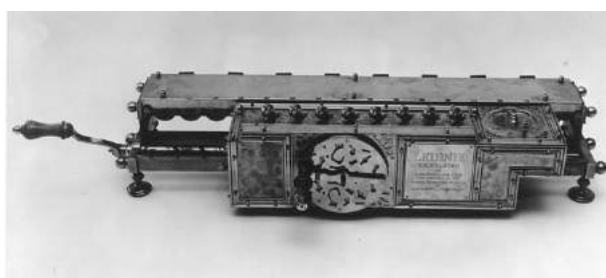


Fig. 2.6. Calculadora de Leibniz. 1694

El mismo Leibniz, a partir del estudio de las figuras formadas por los hexagramas del tratado chino *Yijing*, que representan un código binario, se inspiró para formular una numeración y una aritmética basada en estos principios, e incluso llegó a proyectar la concepción de un instrumento de cálculo binario. Los misioneros jesuitas enviados a China por la corona francesa no sólo trajeron estas ideas a Leibniz; también dieron a conocer en la Europa de finales del XVII las concepciones dualistas del Ying y el Yang y los principios del método dialéctico que tanto inspirarían más tarde a Hegel y Marx. Leibniz interpretó la aritmética binaria no sólo como un método para la notación o el cálculo, sino que le otorgó una trascendencia espiritualista acorde con el cuerpo general de su filosofía. Asoció inmediatamente el uno y el cero con la deidad y la nada, respectivamente, entendiendo la creación como fruto del encuentro de estos dos polos. Llegó a exclamar exaltado: "*Uno basta para sacar todo de nada*".<sup>23</sup>

El estudio del sistema binario se mantuvo por bastante tiempo dentro del terreno de la erudición y refinamientos propios de las matemáticas hasta que a principios del siglo XX, la irrupción de la electrónica en el ámbito de las telecomunicaciones y su continuada presencia en los laboratorios científicos, ligados a empresas de este sector, sirvió de inspiración a la incipiente industria especializada en el tratamiento de la información. Hasta este momento, el sector informático se había apoyado en el desarrollo de equipos eminentemente mecánicos y electromecánicos, como eran las máquinas de escribir, las



registradoras, tabuladoras, calculadoras, etc., para procesar unos datos cada vez más numerosos, relativos a los nuevos censos, afiliaciones a la seguridad social, seguros médicos, a la actividad burocrática propia del sector financiero y de las aseguradoras, de los periódicos y las agencias de información, etc. Sin embargo, pronto se comprendió que los dispositivos electrónicos, desarrollados mayormente a partir de la primera década del siglo XX, como fueron los relés, válvulas, circuitos, fototubos, etc., podían ser aplicados con facilidad en estas tareas, con la ventaja de adaptarse a procesos lógicos y matemáticos, tales como el sistema binario. Hasta entonces, lo más común fue la construcción de pesadas y voluminosas máquinas electromecánicas, normalmente de funcionamiento decimal, entre otras razones porque el movimiento de sus engranajes, ejes y ruedas dentadas, se prestaba mejor a este tipo de cálculo. Pero pronto se comprendió que las operaciones matemáticas básicas -en especial la multiplicación- podrían ser mucho más fáciles de realizar por máquinas que manejaran un código de dos variables exclusivamente. Los primeros pasos en esta dirección estuvieron dirigidos a la puesta en práctica del *flip flop*, un dispositivo electrónico, construido por Eccles y Jordan en 1919, mediante válvulas termoiónicas, que formó parte de los primeros circuitos electrónicos de funcionamiento binario. A partir de aquí surgieron numerosos proyectos y artilugios



**Fig. 2.8. Máquina de calcular binaria de Stibitz, Model III, 1944.**



**Fig. 2.7. Konrad Zuse con su ordenador Z4. A la derecha, película cinematográfica con perforaciones para la lectura y almacenamiento de datos. h. 1940.**

de este tipo, como la Z1, construida por Konrad Zuse en 1936, que tal vez fue la primera calculadora binaria de la historia; la ABC, de Berry- Atanasoff, también binaria y construida en 1939; la Model I, de George Stibitz, en 1940, una sumadora electrónica binaria, etc. Estos proyectos se vieron completados con los estudios teóricos de Claude Shannon sobre lógica binaria aplicada a circuitos de conmutación telefónica, publicados en 1937. En todas estas primeras máquinas electrónicas de cómputo, la entrada de datos y la visualización de resultados se llevaba a cabo normalmente mediante tarjetas perforadas, cintas de teletipo, o incluso películas cinematográficas (Fig. 2.7. y 2.8.). La

revolución que se avecinaba en todos los ámbitos de la tecnología, avivada por dispositivos electrónicos de tan simple funcionamiento, difícilmente podía ser adivinada en aquellos años. La imagen digital de nuestros días se debe, en gran parte, a todos aquellos esfuerzos, cuyo origen podemos situar en la invención del cero.

### **2.1.3. El horror al vacío.**

El cero, representado por la posición "*desconectado*" que adoptan los circuitos electrónicos, diseñados bajo criterios lógico-matemáticos, se volvió a encontrar con el vacío; en este caso, el producido en esas mismas válvulas que hacían posible la detección y amplificación de señales electromagnéticas para las comunicaciones por radio, o en los tubos de imagen que pronto servirían como elementos de

memoria y como canal de visualización de datos y de imágenes. De esta manera, el vacío se materializó en un fenómeno físico. Quedaban lejos los tiempos de las antiguas concepciones sobre la vacuidad, tan presentes en las religiones orientales, o en el pensamiento de los atomistas griegos; la ciencia moderna lo había atrapado en el interior de las bombas y de los tubos de cristal, para interpretarlo simplemente como un fenómeno físico, que permitía provocar una serie de estados singulares en la naturaleza y en numerosos procedimientos experimentales de los laboratorios. El vacío, de ser entendido originalmente como un estado hipotético, inherente a la naturaleza, de gran utilidad a la hora de comprender el funcionamiento del universo y de la materia, pasó a ser un mero indicador de la presión atmosférica, o un punto de referencia o patrón para fijar determinadas unidades de medida, entre otras, la propia velocidad de la luz. La ciencia actual entiende el vacío como todo el rango de presiones que se encuentra por debajo de la presión de la atmósfera, o sea, por debajo de 105 Pascales o 760 Torricelis<sup>24</sup>. Curiosamente, en la cultura y en la lengua india, la palabra *ambara* o *abhra*, que significa atmósfera, se asocia comúnmente al cero y al vacío. El vacío es un fenómeno, como el *éter* o el *calórico*, que nos ayuda también a reflexionar sobre la utilidad de las imágenes físicas que se construyen para dar cabida a lo desconocido e inobservable, y acerca de la terminología que va perfilándose en la ciencia con el paso del tiempo, hasta encontrar su verdadero valor y sentido.

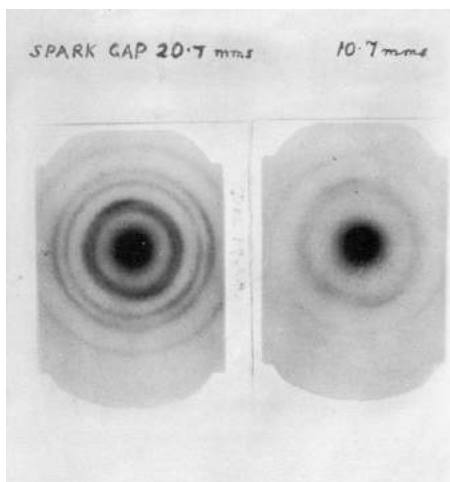
En su día, el universo atomista de Epicuro admitió ese estado hipotético en el que habita la nada y que se encuentra más allá de los sentidos, para ofrecer una explicación del movimiento de las cosas y de la discontinuidad y transformación del mundo. El momento histórico así lo exigía y esa fue probablemente la interpretación más acorde con los requisitos de la ciencia de entonces. Siglos más tarde, Descartes, con los ojos y la mente de un científico moderno -que ya conocía el microscopio y el telescopio, el desarrollo de la óptica geométrica, el universo mecánico de Kepler y Galileo, y probablemente los primeros experimentos de producción de vacío llevados a cabo por Torricelli y por von Guericke- se opuso a la noción de la nada, que vio como una pura contradicción. Y pasó a subscribir la creencia medieval *Natura abhorret a vacuo*, precisamente en una época en la que las concepciones metafísicas sobre el vacío comenzaban a dejar de interesar, entre otros motivos, por la proliferación de experimentos en torno a la producción de vacío mediante sifones, pompas y barómetros. En este contexto, son famosos los primeros estudios de Torricelli en 1640 sobre la presión del aire producida en tubos rellenos de mercurio, con los que determinó la existencia y la variabilidad de la presión atmosférica a diferentes altitudes y asentó las bases para la construcción del primer barómetro. Ocho años más tarde, Perier, cuñado de Pascal<sup>25</sup>, equipado con un barómetro de mercurio de cuatro kilos subió a un pico de los Alpes para comprobar cómo la presión atmosférica ascendía a más de 7,5 cm, incitando a los investigadores de la época a la construcción de nuevos barómetros y a la producción de niveles mayores de vacío. En este empeño ya trabajaban varios investigadores, entre ellos Otto von Guericke, quien a partir de 1640 comenzó a experimentar con barriles y esferas de cobre a los que extraía el agua o el aire con el afán de provocar el vacío en su interior. Estos experimentos le ocasionaron algún que otro disgusto, dada la reacción violenta de los contenedores, deficientemente sellados o hermetizados; pero superó estas adversidades, entre otros motivos, por su deseo de contradecir el horror que Descartes sentía por el concepto de vacío, tal como dio a conocer públicamente en su obra *Principia*, de 1644.

Guericke estudió concienzudamente los efectos producidos por sus experimentos en los recipientes utilizados y concluyó que el vacío debía ser un fenómeno ocasionado por la presión atmosférica, argumento con el que quiso interpretar también la formación de las tormentas. A los pocos años, en 1654, hizo su famosa demostración en Magdeburgo, ante los ojos del emperador, empleando unos hemisferios de cobre que serían conocidos en el futuro por el nombre de esta

ciudad. Guericke provocó el vacío en el interior de estas esferas ante la mirada atónita del público, que no podía comprender cómo la fuerza de veinticuatro caballos era incapaz de despegarlos, cuando se conseguía fácilmente con sólo abrir una pequeña espita que dejaba entrar el aire. El conjunto de todas estas demostraciones sirvió para que la primera bomba de vacío quedara inventada, en este caso, la bomba de aire. Pronto la noticia se difundió por toda Europa y fueron numerosos los científicos que se pusieron a construir su propia bomba o a mejorar el modelo existente. La historia de la ciencia ya contaba con claros antecedentes de estos artilugios, como eran los órganos tubulares griegos, las bombas de agua empleadas por los romanos en la extracción de agua de las minas o los tubos sifones y pistones utilizados por Galileo con fines similares.<sup>26</sup>

Todos estos primeros ensayos de finales del XVII marcaron el inicio de un periodo de construcción de bombas fabricadas eminentemente por procedimientos mecánicos, que se prolongó hasta finales del XIX. Las bombas aparecidas en este largo periodo de más de dos siglos fueron derivaciones de los modelos originales de Guericke, a los que se fueron añadiendo mejoras sustanciales mediante pistones, válvulas, engranajes, mecanismos rotatorios, émbolos, etc. Entre las más notables, cabe destacar la bomba neumática de Robert Boyle y Robert Hooke; la de Denis Papin, con empleo de la fuerza del vapor, y construida en el siglo XVII por encargo de Huygens<sup>27</sup>; la de dos pistones de Francis Hauksbee, de principios del siglo XVIII; la de Thomas Newcomen, de 1712, basada también en la utilización de vapor de agua, y con una gran repercusión en el desarrollo industrial de la época, una vez que comenzó a ser empleada en las minas y en el bombeo de agua para las casas y los talleres, especialmente en épocas de sequía. Así, hasta llegar a la accionada por mercurio, de Benjamin Thompson Rumford, de 1786, y a otras versiones más industriales, aparecidas ya a finales del siglo XIX, como fue el caso de la bomba Geryk o bomba de aceite, de H. A. Fleuss, formada por cilindros en los que se inyecta aceite, presionado y succionado por pistones. Esta última bomba, que experimentó grandes mejoras en las primeras décadas del siglo XX con la incorporación de mecanismos giratorios, fue ampliamente utilizada en la industria de las lámparas incandescentes, una nueva y revolucionaria forma de iluminación en la que la producción de vacío fue un requisito imprescindible.

Uno de los hitos más importantes de la historia de la ciencia de este siglo, el descubrimiento de la difracción del electrón por parte de Germer y Davisson en 1927, se hizo gracias a la participación de uno de estos tubos de vacío. Este experimento, comentado en páginas anteriores, se llevó a cabo en los laboratorios Bell, centro de investigación dedicado preferentemente a las telecomunicaciones, concretamente en un área de estudio destinada a mejorar la capacidad de amplificación de las válvulas triodos utilizadas en la transmisión de señales a través de los nuevos cables submarinos transcontinentales<sup>28</sup>. Con este trabajo se consiguió corroborar la doble naturaleza de la materia, de acuerdo con las predicciones teóricas recogidas años antes por las tesis de la *mecánica ondulatoria* de Louis de Broglie. Los autores utilizaron un tubo de vacío que fue diseñado específicamente para comprobar la polarización de un haz de electrones. El rayo fue proyectado sobre una placa de níquel, que lo reflejaba en un ángulo de 45° sobre otra placa del mismo material, para ser recogido, en última instancia, por un colector tipo galvanómetro o directamente sobre placas fotográficas (Fig. 2.9.). El colector cubría un ángulo de 135°, lo suficientemente amplio como para recoger la totalidad de las trayectorias de los electrones emitidos. Procedimientos similares se habían llevado a cabo años antes mediante la técnica de difracción de rayos X, por Max von Laue (1912), con resultados de gran trascendencia para el estudio de la estructura atómica de los cristales. El hecho de que la comprobación experimental de las tesis de la mecánica ondulatoria fuera una meta perseguida mediante montajes similares en fechas muy próximas, y por científicos de gran prestigio, procedentes de diversos laboratorios del mundo, principalmente de Inglaterra,



**Fig. 2.9. Difracción del electrón.**  
Germer y Davisson, 1927.

Alemania, Francia y Estados Unidos, y que fuera en este último país donde se consiguiera llevar a cabo esta hazaña, demuestra hasta qué punto fue determinante el nivel tecnológico y la preparación de los laboratorios y, más específicamente, el avance en la construcción de dispositivos generadores de alto vacío y de técnicas de detección de electrones. Este hecho es sintomático del cambio de paradigma que comenzó a darse a principios del siglo XX en la ciencia, una vez que los grandes laboratorios, ligados mayormente a la industria, entraron en la escena de la investigación científica. Este nuevo modelo de hacer ciencia, marcado por un carácter más institucional y colectivo, supuso el inicio de un alejamiento progresivo de una tradición científica, que había prevalecido durante siglos, y que se caracterizaba por el trabajo personalizado y artesanal de los

científicos, trabajo que era llevado a cabo en pequeños laboratorios y mediante una instrumentación que en la mayoría de los casos, era de autoconstrucción.

Las aplicaciones de las técnicas de vacío a partir del final de la última guerra mundial se desarrollaron con intensidad en los programas espaciales, verdadera punta de lanza de esta tecnología<sup>29</sup>, así como en la detección de partículas atómicas por los diferentes aceleradores, en la investigación de la energía por fusión y en la fabricación de circuitos integrados y de dispositivos electrónicos que son depositados en películas superfina, donde los procesos fotolitográficos a escala nanométrica requieren de la generación de un alto vacío<sup>30</sup>. En la investigación de estos fenómenos, la observación a escala atómica ha sido de especial importancia para el desarrollo de toda la tecnología productora de imagen electrónica. Los procesos de fotoemisión o de fotoconducción, tan decisivos en los procesos de adquisición de imágenes por procedimientos electrónicos, sólo pueden ser estudiados con el debido rigor si las superficies observadas están libres de toda contaminación y si los fenómenos que allí suceden pueden ser observados con suficiente tiempo -o, lo que es lo mismo, con la debida lentitud-, algo que sólo permiten las cámaras de ultra vacío. En términos generales se puede decir que las técnicas de producción de vacío a lo largo del siglo XX son las que han permitido el avance de toda la tecnología electrónica de tubos de vacío y de materiales semiconductores, hasta llegar a las actuales cámaras y sensores de estado sólido. La persecución histórica de dos conceptos tan singulares como son el cero y el vacío ha tenido especial trascendencia en el conjunto de la ciencia moderna y, más en particular, en las distintas tecnologías de captación y generación de imágenes.

## 2.2. La electricidad en busca de imágenes

La electricidad está ligada desde tiempos inmemoriales a los fenómenos de la luz. Cuando a finales del siglo XIX se consigue hacer una síntesis magistral de los fenómenos electromagnéticos y ópticos, al contemplarse la luz visible como parte integrante de un espectro casi inabarcable, que comprende desde los rayos cósmicos a las ondas producidas por la señal de un telégrafo eléctrico, se logra en realidad unificar y dar sentido a un cúmulo de experiencias que se remontan al origen de los tiempos. La continua observación de efectos luminosos emitidos por distintos objetos presentes en la naturaleza, el cambio de color que se produce en los materiales por efecto de la luz, la manifestación de diversas radiaciones o de



luz que acompaña a los fenómenos eléctricos, hasta llegar a la comprensión de los procesos subatómicos que se producen en el efecto fotoeléctrico, son hechos que la ciencia ha estudiado a lo largo de los siglos, y que constituyen en la actualidad los fundamentos sobre los que se edifica la ciencia de la fotoelectricidad y parcelas del conocimiento derivadas de ésta, como es la imagen electrónica. No estará de más insistir en que el estudio y la interpretación de los fenómenos de la luz y de la electricidad, en términos generales, afecta a la mayor parte del trabajo científico actual, tanto experimental como teórico, incluyendo los procesos de adquisición y producción de imagen artificial, no sólo electrónica sino del resto de formas que presenta la imagen tecnológica de nuestros días. La historia en este sentido puede ser esclarecedora y tremendamente inspiradora de nuevas rutas de investigación o para comprender el estado actual de la ciencia contemporánea en estas cuestiones.

La electricidad es una forma de energía presente en la naturaleza que puede ser conducida, manipulada o controlada para producir una serie indeterminada de efectos, como es su fuerza mecánica, hacer visible determinados objetos, establecer comunicaciones a distancia, u ofrecer resultados de una forma gráfica o mediante imágenes. La imagen de dos dimensiones que estamos acostumbrados a ver en fotografía digital -en un monitor de televisión o en la pantalla LCD de una cámara digital o de un teléfono móvil- es una manifestación más de lo que podemos conseguir mediante el uso refinado y preciso de la fuerza eléctrica. Cuando en el siglo XII a. C. el emperador chino Tsching- Wang regala a los embajadores extranjeros un "*Fse-nan*", o indicador del Sur, consistente en una aguja magnética que flotaba libremente sobre un líquido, además de encontrarnos con un claro precursor de la brújula moderna, nos hallamos también ante una primera forma de visualizar un fenómeno natural, oculto gracias al poder de la electricidad. Desde ahí al osciloscopio, un moderno instrumento de principios del siglo XX que nos muestra las figuras que producen las corrientes eléctricas sobre la pantalla de fósforo de un tubo de rayos catódicos, han transcurrido muchos años, pero el concepto es el mismo. Lo único que ha cambiado es la forma de visualización, de un indicador mecánico hemos pasado a una imagen de dos dimensiones. Estas dos formas de comprobar resultados, de observar el desenlace o los productos que son fruto de la experimentación conforman dos procedimientos de observación básicos dentro del método científico. El dato cuantitativo que nos ofrece una medición precisa, ya sea de nivel, numérica, de grado, etc., como puede ser la altura del mercurio en un termómetro, un voltaje, un chasquido de un contador Geiger, etc., contrasta con la información que nos proporciona una imagen. Si en la primera, la información es cerrada y concluyente, y entra de lleno, de forma integrada en un esquema interpretativo, normalmente axiomatizado; en el caso de las imágenes, la constatación del fenómeno es abierta, pero también única, puesto que la información que nos ofrece puede servir para refutar todo un cuerpo teórico anterior, abriendo a un mismo tiempo nuevas rutas a la investigación. La imagen no está ligada necesariamente al número, es una continuación o prolongación de lo natural en nuestros sentidos. La imagen de un acontecimiento nuevo puede ser demoledora y revolucionaria, porque a partir de ella se inician nuevos caminos para la exploración científica. En este sentido, es como el descubrimiento de un continente, de un nuevo insecto o de una estrella. Y esta cualidad es la que comparte con aquella otra imagen que es creada por las manos del arte, las dos pueden llegar a ser rompedoras y desestabilizadoras en un principio, pero altamente inspiradoras y fructíferas a partir de su descubrimiento.

Para que la electricidad se constituyera como ciencia hizo falta un trabajo previo de identificación y catalogación de sus fenómenos a lo largo de los siglos. La observación de los poderes de atracción de la magnetita por Tales y Platón, se fue completando con la de otras manifestaciones de lo eléctrico como la emisión de luz

por ciertos minerales, o incluso por algunos seres vivos. La luminiscencia de algunos metales y sustancias como el mar, la carne y algunos hongos de la madera podrida ya fueron comentados por Aristóteles. Y Plinio lo hizo extensible a algunas piedras preciosas. A este tipo de manifestaciones de lo eléctrico se fueron añadiendo otras menos evidentes, pero no por ello de menor trascendencia, como la descrita por Scribonius Largus en el año 48 de nuestra era, al comprobar los poderes curativos de algunos animales, como los peces eléctricos, en enfermedades como el reuma. Todo un signo precursor de nuestra moderna radioterapia.

Sin embargo, sería el Renacimiento, con la correspondiente formación de la ciencia moderna, el que daría una nueva dimensión al conocimiento y a la utilidad de todos estos fenómenos observados durante milenios. La brújula, empleada en China desde principios de nuestra era e importada a Europa por los árabes alrededor del año 1300, como tantas otras invenciones<sup>31</sup>, cobra en esta época una importancia inusitada como instrumento decisivo para la navegación y para las múltiples expediciones que se organizan por el planeta. Las necesidades productivas del incipiente capitalismo son las que motivan que el conocimiento de estos fenómenos sea llevado a fines prácticos, rentables y operativos. Los nuevos criterios científicos aplicados a la electricidad comienzan a aflorar en la obra de William Gilbert (1544- 1603), en su *De Magnete*, de 1600. Aquí, se le asigna su nombre actual, *electricidad*, del griego *elektron* o ámbar, a la par que es entendida como una fuerza natural independiente, susceptible de ser medida. De hecho, Gilbert fue el primero en idear un medio de visualización de la fuerza eléctrica, lo que podríamos catalogar hoy día como un electrómetro o un electroscopio, al comprobar los movimientos de una aguja imantada que había suspendido previamente de una brizna de paja. También a él se deben otras ideas fundamentales sobre lo eléctrico, como son la distinción entre cuerpos aislantes y conductores, la demostración de que la fuerza magnética disminuye con el calentamiento al rojo de los metales, o la concepción de la tierra como un gran imán. Estas primeras formas de entender y poner en práctica el método experimental influyeron decisivamente en las ideas de Francis Bacon y de Galileo, principales artífices de la creación de los métodos inductivo y deductivo en ciencia, respectivamente, y grandes conocedores de la obra de este científico.

A un mismo tiempo, los fenómenos luminosos presentes en la naturaleza comenzaron a despertar un gran interés a partir del descubrimiento de la *lapis solaris* o piedra que refulege con propiedades lumínicas entre las ascuas del carbón, y que hoy conocemos por sulfuro de bario. Este es un descubrimiento de principios del XVII, que se debe a un zapatero de Boloña, de nombre Casciorolo. Fue tal el impacto de este acontecimiento en la comunidad de científicos y alquimistas que la segunda mitad del siglo pasaría a denominarse época del fósforo<sup>32</sup> por despertarse la búsqueda intensa de nuevos materiales fosforescentes. Fue Christoph Adolph Balduin quien descubrió en 1674, de forma accidental, pero siguiendo un procedimiento totalmente científico, el fósforo o "*piedra luminosa*", al producir nitrato de calcio a partir de una solución de yeso en ácido nítrico. La aparición mágica de la roca encendida en una zona oscura de su laboratorio le hizo creer que había encontrado la piedra filosofal que con tanto ahínco buscaban los alquimistas de la época. El fósforo vendría a desempeñar con el tiempo un papel de primer orden en la formación de imágenes en los tubos de rayos catódicos presentes en nuestros actuales monitores de televisión y de ordenador.

En 1700 se produjo un verdadero acontecimiento en la sociedad del momento cuando el astrónomo Edmund Halley presentó el primer mapa mundial del magnetismo, en el que quedaban unidos todos los puntos de igual declinación magnética. Las ideas de Gilbert sobre la tierra entendida como un gran imán y el



uso metódico de la brújula en sus continuas expediciones le permitieron el trazado de esta importante carta, que podemos considerar la primera representación sobre un papel de un fenómeno electromagnético (Fig. 2.10). Con este hecho, de especial relevancia para la navegación del momento, se inicia un siglo, el XVIII, en el que la electricidad se convierte, junto a la química, en una de las áreas de la ciencia con más empuje. Aún será pronto para vaticinar una andadura común de ambas disciplinas a partir de la segunda mitad del siglo XIX, cuando la química se convierta en un capítulo más de la física, cuando la óptica sea comprendida dentro del electromagnetismo, y el electrón danzante alrededor del núcleo atómico llegue a ser el elemento base de todas ellas.

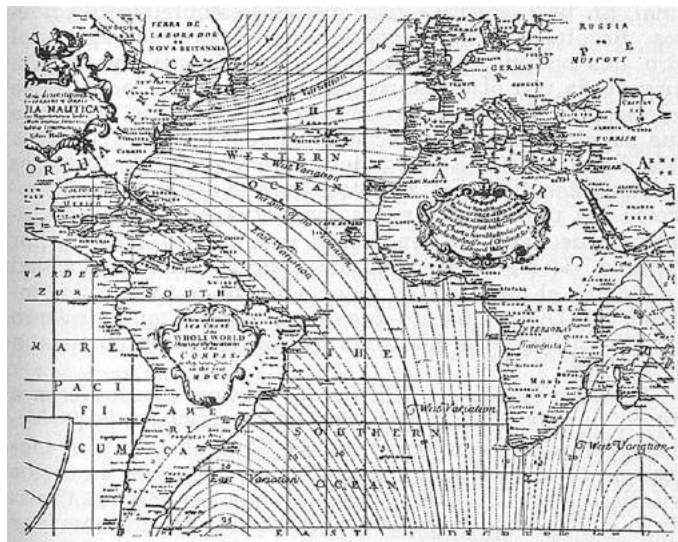


Fig. 2.10. Mapa geomagnético de E. Halley. 1700.

En estos primeros años del siglo XVIII, se producen también unos acontecimientos decisivos para el desarrollo de la fotografía, al constatar el ennegrecimiento de las sales de plata por la acción de la luz. Será la intensa labor de investigación de Johann Heinrich Schulze (1687- 1744), a partir de 1725, sobre las propiedades luminosas de los metales y de otras sustancias, el camino que le llevará a este importante descubrimiento. En su intento por obtener una sustancia fosforescente a partir de un compuesto de tiza y ácido nítrico, en el que previamente había disuelto restos de plata, constató que el tono blanco de la composición se oscurecía inmediatamente tan pronto como se acercaba a una ventana y la mezcla quedaba expuesta a los rayos del sol, mientras que las partes que permanecían a la sombra quedaban inalteradas<sup>33</sup>. En los restos de plata encontró el secreto, comprobando que era esta sustancia la verdadera causante del ennegrecimiento del compuesto químico. Aunque las sales de plata ya se habían utilizado desde la antigüedad para teñir la madera, el marfil, las pieles y las plumas<sup>34</sup>, este físico decidió probar una utilidad nueva con ellas, dedicándose a pegar recortes de papel con forma de letras y números en las botellas que contenían el compuesto, obteniendo de esta manera copias de esos signos en la tiza plateada. Con este procedimiento había conseguido lo que en verdad puede ser considerado como el primer fotograma percedero de la historia, ya que al moverse las botellas de sitio, las impresiones desaparecerían.<sup>35</sup>

Las investigaciones en torno a la fotosensibilidad de multitud de materiales se dispararon en estos años, valga destacar el descubrimiento en 1733 de las propiedades fotoquímicas de las sales de mercurio, a cargo de Kaspar Neumann; o los experimentos llevados a cabo con las sales de plata por Carl W. Scheele, próximos a descubrir un método de fijación de las imágenes resultantes. No obstante, la ciencia tendría que esperar casi un siglo desde el descubrimiento decisivo de Schulze en 1727, para poder encontrar una vía de aplicación de las propiedades fotosensibles de estas sales en sistemas de reproducción gráfica permanente, como el daguerrotipo y el calotipo.

La electricidad, mientras tanto, comenzaba a dar pasos más afianzados en su constitución como ciencia. En este mismo año de 1727, Stephen Gray descubrió la conductibilidad de la electricidad, utilizando cuerdas de cáñamo humedecidas y suspendidas por hilos de seda. Al poco tiempo, en 1733, Ch. Fr. Du Fay reconoció la existencia de dos clases de electricidad, que quedaron denominadas como «positiva» y «negativa». Para llegar a esta conclusión, se inspiró en los experimentos que había realizado previamente Otto von Guericke en 1672 sobre la atracción y repulsión que sufrían determinados objetos como el papel o las plumas, concretamente al frotar con fuerza una esfera de azufre que había montado sobre un eje de hierro. Al mismo tiempo, Du Fay fijó el principio de actuación de lo que serían las futuras válvulas termoiónicas, tan utilizadas en la radio y en los ordenadores de la primera mitad del siglo XX, al estudiar el efecto que producía el calor en los cuerpos conductores. Al electrizar hierro llevado al rojo vivo, comprobó cómo el aire de alrededor se volvía conductor.

A mitad del siglo XVIII, se produjeron varios intentos de almacenar la energía eléctrica. Un hecho decisivo en este sentido, fue cuando E. J. de Kleist sufrió una fuerte descarga al tocar un clavo que se había electrizado por sí solo en el interior de un bote húmedo, hallazgo que le sirvió para idear la «botella de Leiden», primer artilugio útil para el almacenamiento de electricidad, o primer condensador de la historia. El invento recibió el nombre de la ciudad de Leiden porque fue allí donde el profesor de física Pieter Musschenbroeck lo dio a conocer. Este invento cobró especial trascendencia cuando Heinrich Hertz lo utilizó para propagar las ondas de radio, a finales del XIX.

La segunda mitad del siglo XVIII se inició con las decisivas contribuciones de Benjamin Franklin a esta ciencia. Este prolífico autor comenzó por dar una explicación de las fuerzas de atracción y repulsión de la electricidad, y de su carácter bipolar, mediante la formulación del concepto de fluido eléctrico. Mientras más fluido existe en un cuerpo, más cargado positivamente estará, y viceversa. Franklin cobró una popularidad notable con sus investigaciones de los fenómenos eléctricos, especialmente cuando demostró la naturaleza eléctrica del relámpago mediante el uso de cometas y de botellas de Leiden en las que almacenaba la electricidad de los rayos, y luego comparaba con la que se producía por medios electrostáticos; o cuando construyó uno de los primeros pararrayos de la historia. Pero atendiendo a acontecimientos más próximos a nuestra materia, es digno de mención el año 1782, año en que R. J. Haüy descubre la piezoelectricidad, un fenómeno electromecánico, que aprovecha las vibraciones y tensiones ocasionadas por la presión en los cristales para la generación de ondas radioeléctricas estables. Inversamente, la aplicación de un campo eléctrico a un cristal piezoeléctrico genera una serie de deformaciones y vibraciones en el mismo, y es cuando la corriente iguala la frecuencia de estas vibraciones que se produce el efecto de la resonancia. Las contribuciones de Haüy a la física y a la cristalografía influyeron decisivamente en los trabajos de Fresnel sobre óptica y en su teoría ondulatoria de la propagación de la luz. Haüy estudió la composición de los cristales, sus formas geométricas, las fuerzas de sus enlaces, determinando sus cualidades anisotrópicas; y diferenció también entre eje óptico y eje eléctrico de acuerdo con las fuerzas de atracción y repulsión de los lados del cristal, hechos que pueden ser considerados como los primeros pilares de la moderna cristalografía. Fue al estudiar el Espato de Islandia, que pudo comprobar que se producía una corriente al presionarlo (*comprimir*= *piezein*, en griego). Más tarde constató lo contrario, que las cargas eléctricas producían más o menos densidad en los cristales, ocasionando variaciones en sus formas y haciéndolos vibrar. Este es el fundamento científico- técnico del ultrasonido y de las diferentes técnicas de resonancia (ver Cap: 6.2.5.). El control de las frecuencias y de las vibraciones de los cristales, en especial del cuarzo, es la base tanto de estas tecnologías como de los relojes de cuarzo. En 1917, Paul Langevin, que dedicó muchos años de su

carrera a proseguir los trabajos de Hauy, estudió en profundidad los sonidos inaudibles, experiencias que puso en práctica con el desarrollo de técnicas de ultrasonido para la detección de submarinos durante la primera guerra mundial.

En las dos últimas décadas del siglo XVIII se produjeron contribuciones decisivas a la formación de la ciencia de la electricidad, a manos de Coulomb, Galvani y Volta. Charles A. Coulomb (1736-1806) fijó las leyes básicas del magnetismo y de la electrostática siguiendo el modelo de la mecánica gravitatoria de Newton. Básicamente, comprobó como las fuerzas generadas por las cargas eléctricas siguen la clásica ley de la inversa del cuadrado de las distancias. Los matemáticos Poisson y Gauss se encargaron de desarrollar posteriormente, más en firme y mediante modelos matemáticos, estas teorías enunciadas en un principio de forma muy básica. Al mismo tiempo, Luigi Galvani abrió el campo de estudio de las corrientes eléctricas a partir de una intensa experimentación con las reacciones que algunos peces "eléctricos" y ranas presentaban ante las descargas a las que eran sometidos, normalmente generadas por botellas de Leiden (Figura 2.11). Las contracciones espasmódicas de las ancas de las ranas producidas por las descargas le sirvieron para confirmar su concepto de corriente, llegando a postular la posibilidad de generar electricidad por el camino inverso, a partir de las contracciones de los músculos de estos batracios. Aunque era pronto para conseguir este propósito, Galvani sí llegó a idear un "reoscopio fisiológico", aparato para la detección de pequeñas corrientes, hecho con fibras musculares animales. Esta acumulación de experiencias fue configurando el concepto de electricidad o de corriente galvánica, entendida como la electricidad producida por contacto químico, que es la base de la electrotecnia y de la galvanoplastia, o técnica destinada a producir moldes y metales cerámicos. Se abrió, de esta forma, un nuevo ciclo de investigación dentro de la electricidad, caracterizado por el estudio de las cargas en movimiento, lo que significó ir más allá de la atención exclusiva a los fenómenos electrostáticos.

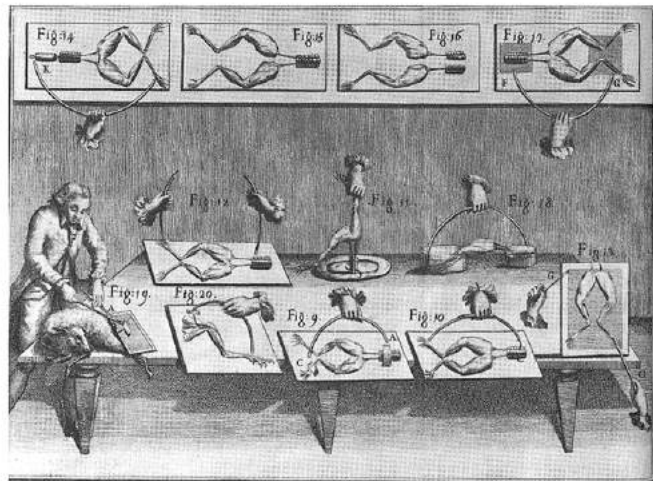
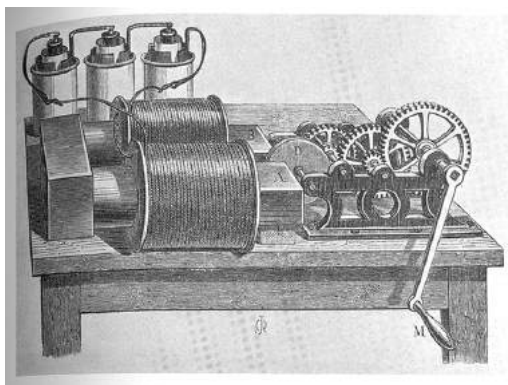


Fig. 2.11. Experimentos de electricidad animal. Galvani. 1786.

Alessandro Volta profundizó en el trabajo de Galvani, inventando una fuente de alimentación de corriente constante, basada en la transformación de la energía química en eléctrica, que recibió el nombre de pila de Volta. Apilando capas de zinc y cobre humedecidos y uniendo los dos extremos por un hilo conductor, comprobó la presencia de corriente. Este tipo de acumulador supuso una ventaja sobre las formas de generación de corriente hasta entonces en uso: la botella de Leiden y las máquinas electrostáticas, manteniéndose operativo hasta la llegada de la dinamo. Las diferencias entre la electricidad estática o por frotamiento y la electricidad dinámica de las corrientes quedó fijada de forma científica en 1827 con los trabajos de Georg Simon Ohm, que relacionó matemáticamente los conceptos de fuerza electromotriz, rendimiento e intensidad de las corrientes. Por entonces, la electroquímica había acumulado experiencias y conocimientos de la envergadura de la electrolisis con la que se pudieron descomponer de una forma práctica y precisa los diversos compuestos químicos. El primer elemento que se logró descomponer fue el agua, por P. van Troostwijk y Deiman en 1789/36, quienes constataron la concentración de hidrógeno y oxígeno en cada uno de los bornes de



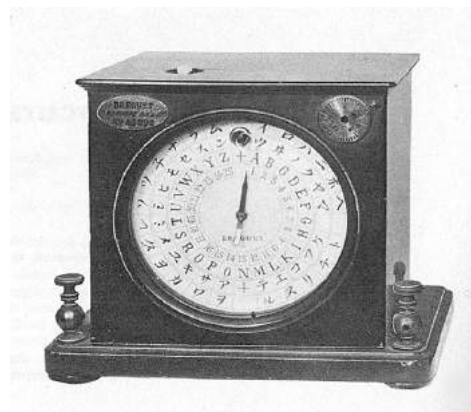


*Fig. 2.12. Experimento de Foucault para la corriente inducida. Electroimanes y condensadores. 1857*

una pila de Volta cuyos electrodos habían sido sumergidos en agua salada. Esto supuso una técnica revolucionaria para la identificación de nuevas sustancias, como el sodio y el potasio, descubiertos por Humfrey Davy en 1807; y para la identificación de determinados pesos atómicos por Faraday en 1833, quien también desarrollaría con precisión toda la terminología concerniente a la electroquímica. Electrolisis, ánodo y cátodo, anión y catión, o iones, fueron nuevos términos que salieron a relucir. Las relaciones de la electricidad con la química estaban fijadas, y en poco tiempo se comenzó el estudio de sus relaciones con el calor, con la luz y con el magnetismo.

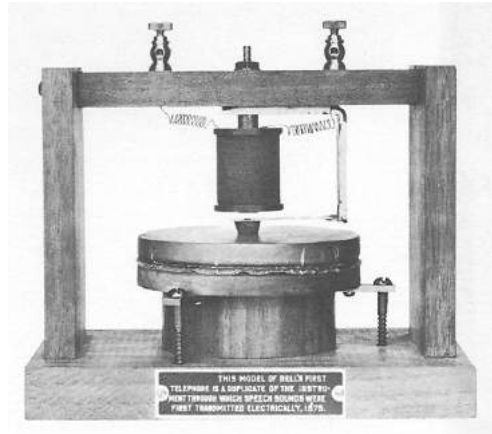
En este contexto es importante reseñar que en los años en torno al cambio de siglo, se comenzaron a idear una serie de procedimientos fotométricos, de los que daremos amplia cuenta en capítulos posteriores (ver caps: 2.8.2; y 5.2.3.), basados en las diferentes reacciones que presentan determinados compuestos químicos ante la acción de la luz. Un ejemplo de ello fue el *aire vital* de Berthollet, o pequeñas burbujas que se evidencian en el agua clorada por la presencia de la luz, idea que fue aprovechada para la construcción de un primer fotómetro. O las investigaciones llevadas a cabo por A. F. de Fourcroy sobre el efecto calorífico que producen las corrientes eléctricas, tras observar la incandescencia de un alambre mal conductor, lo que supuso un antecedente directo de las futuras lámparas incandescentes y de los amperímetros, voltímetros y vatímetros. Un paso decisivo en la historia de la electricidad vino dado por los trabajos de H. C. Oersted (1777-1851). Este científico danés fue el primero en detectar en 1820 la relación que se producía entre electricidad y magnetismo al comprobar cómo una aguja imantada experimentaba variaciones de posición al paso cercano de una corriente eléctrica. En este simple hecho, que nos permite visualizar la presencia o no de una corriente, o su intensidad, se encuentra el origen de un instrumento de medición de corriente como es el galvanómetro, y uno de los principios básicos en el que se fundamentan las telecomunicaciones modernas. El telégrafo eléctrico fue el primer medio de telecomunicación que comenzó a regirse por este importante descubrimiento. Y el electroimán fue el dispositivo que lo hizo posible. Consiste básicamente en una pieza de hierro que se envuelve rápidamente con un hilo de cobre, adquiriendo las propiedades del imán cada vez que hacemos pasar corriente a través del hilo (Fig. 2.12). Para establecer una comunicación a distancia, tan sólo necesitamos un simple interruptor en el lado del emisor que controle el paso de la corriente, y que accionamos de acuerdo con un código determinado, como el código Morse, por ejemplo. Estos impulsos de corriente, al llegar al extremo del receptor, activan un electroimán que con su fuerza magnética mueve una aguja indicadora o un dispositivo gráfico, de acuerdo al código emitido. (Fig. 2.13)

Con este procedimiento tan sencillo se puede establecer un canal de comunicación entre un emisor y un receptor colocados a la distancia que nos permita la extensión del

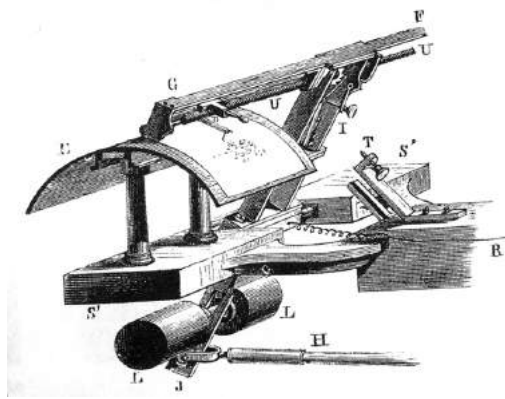


*Fig. 2.13. Telégrafo de Bréguet. Aparato receptor, de 1870.*

cable. Este modelo es el que posteriormente se aplicó al teléfono, con la diferencia de que el electroimán, en este caso, se mueve de acuerdo con las vibraciones de membranas colocadas tanto en el micrófono del emisor como en el auricular del receptor (Fig. 2.14); y en las comunicaciones por radio, una vez que se consiguió la amplificación de las ondas generadas por determinados osciladores eléctricos. En la relación que se establece entre la corriente eléctrica y el magnetismo se fundamentó una nueva disciplina que revolucionó todo el panorama de la ciencia posterior: el electromagnetismo; a la vez que sirvió para desarrollar una serie de procedimientos destinados a la formación y transmisión de imágenes a distancia (Fig. 2.15). Es importante llamar la atención sobre la gran repercusión que tuvo en el mundo la puesta en práctica de un sistema de comunicación tan simple como el telégrafo eléctrico. El proceso de internacionalización al que hoy día asistimos, que afecta a todos los ámbitos de nuestras vidas y costumbres, se inició con este sencillo sistema de telecomunicaciones.



*Fig. 2.14. Réplica del primer teléfono ideado por Bell. 1875*



*Fig. 2.15. Telégrafo de Caselli para facsimil, en Las maravillas de la ciencia. de Figuier. 1866.*

Este mismo principio de atracción y repulsión que observamos entre las corrientes y los imanes, lo hizo extensible Ampère a dos corrientes eléctricas, al comprobar que presentaban comportamientos similares cuando eran colocadas una junto a la otra; en realidad, actuaban como dos imanes. Ampère estableció de esta forma los principios de la Electrodinámica, o ciencia de la electricidad en movimiento. Estos fenómenos de inducción que presentan los imanes, el ámbar al ser frotado, o las corrientes eléctricas, y que se constatan por la atracción y repulsión, o por la polarización que presentan los objetos, fueron estudiados en mayor profundidad por Michael Faraday (1791- 1867) a partir de 1821. La gran aportación de este científico

a la ciencia de la electricidad y al conjunto de la sociedad del momento fue la invención de la dinamo en 1831. Al comprobar la acción mutua que se producía entre imanes y corrientes, ideó un artificio mediante el cual consiguió generar corriente a partir del movimiento de un imán. Con esta idea tan simple pudo generar electricidad a partir del trabajo mecánico aplicado a un imán, algo que despertó rápidamente el interés de la industria del momento, puesto que este movimiento mecánico podría conseguirse mediante diversas fuentes de energía, como la combustión de carbón, un salto de agua, o el caudal de un río. Por el camino inverso, a partir de la electricidad, se podía generar movimiento mecánico, lo que sería de gran utilidad para mover maquinaria de todo tipo, tanto en la industrial textil, como en la minería, o los trenes. La ciencia de la ingeniería eléctrica daba de esta forma sus primeros pasos.

Experiencias y resultados eminentemente prácticos y técnicos pronto comenzaron a demandar su correspondiente integración en un plano teórico,

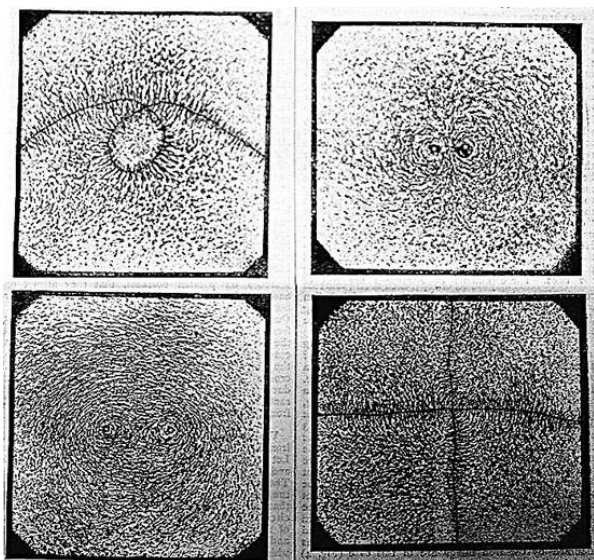


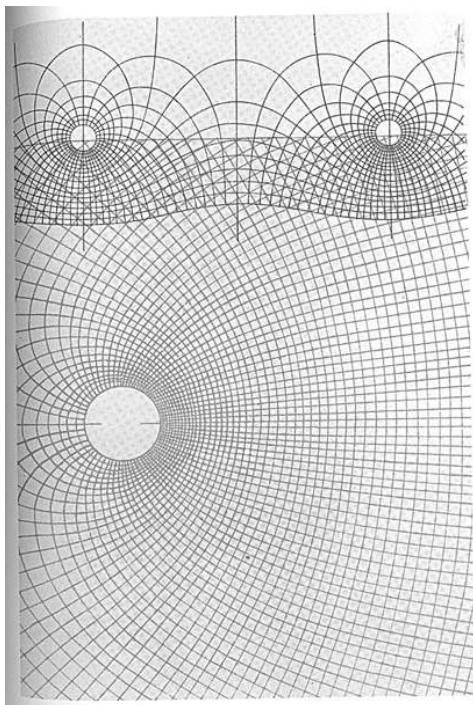
Fig. 2.16 .Limaduras de hierro bajo la acción de un imán.

un mundo de torbellinos con el que quiso explicar la actuación de los campos magnéticos, especialmente sobre la luz. Se sentía intrigado por la rotación del plano de polarización de la luz, fenómeno observado unos años antes por el propio Faraday. Fueron un conjunto de imágenes reales e imágenes mentales, que plasmadas sobre el papel, se pusieron al servicio de la creación científica.

En realidad, el fenómeno de la inducción se producía por la activación de una serie de líneas de fuerza que se encuentran presentes tanto en el interior de las corrientes como en el espacio o éter que se despliega y extiende entre el imán y los cuerpos afectados por su acción. Un imán en movimiento propaga sus líneas de fuerza magnética incluso a través del espacio, pudiendo atravesar un circuito y activar una corriente en el interior del mismo. Estas ideas o imágenes físicas de un fenómeno que tan sólo se hacía evidente u observable por su efecto en las limaduras de hierro, o por la acción mecánica que producía en máquinas o instrumentos, fueron enunciadas de una forma eminentemente intuitiva, pero no por ello dejaron de tener una gran repercusión en el conjunto de la ciencia posterior.

*La introducción del concepto de campo eléctrico marcó un punto de alejamiento de las ideas de Newton, que veía la fuerza como la influencia que un cuerpo ejerce directamente sobre otro cuerpo desde una determinada distancia. Por el contrario, uno piensa en el campo eléctrico relativo a una determinada posición como una condición que el espacio presenta en esa posición, de manera que actúa directamente sobre cualquier cuerpo cargado en esa posición y recibe contribuciones de las cargas eléctricas del resto de las posiciones. Más aún, en física moderna, los campos han tomado no sólo el carácter de unos meros artificios matemáticos que nos ayudan a calcular las fuerzas entre las partículas, sino que son entidades físicas por propio derecho - habitantes de nuestro universo que pueden ser de hecho más fundamentales que las propias partículas. En nuestras teorías modernas, las partículas aparecen como pequeños manojos de energía y estados de movimiento, y como cargas eléctricas de esos campos.<sup>38</sup>*





**Fig. 2.17. Ilustración de las líneas de fuerza en campos magnéticos, de J. C. Maxwell. 1855-6 (Fragmento)**

Fue el propio Maxwell quien ofreció unos años después una formulación matemática a estas intuiciones o *representaciones pictóricas*<sup>39</sup> de Faraday, en su ensayo *Sobre las líneas de fuerza de Faraday*, de 1856; y quien formuló posteriormente la posibilidad de que los cambios magnéticos pudieran producir perturbaciones en el éter, adoptando la forma de ondas. Profundizando en estas ideas, Maxwell comprendió que la velocidad de propagación de estas ondas electromagnéticas era igual que la luz, con lo que postuló que la luz no era más que una manifestación más del conjunto general del espectro electromagnético. Los trabajos posteriores de Heinrich Hertz se encargarían de corroborar experimentalmente estas ideas magistrales.

Para finales del siglo XIX, el paisaje de las ciudades en el mundo industrializado había cambiado drásticamente debido a la aparición de las diferentes formas de la electrotécnica. El alumbrado de las calles, el telégrafo y el teléfono, los motores eléctricos, aplicados de forma generalizada en la industria, o los

primeros cables de alta tensión, contribuyeron a formar un nuevo tipo de sociedad y un nuevo orden mundial. Pero a esta tecnología, regida por un principio que sería conocido más tarde como de *corrientes de gran intensidad*<sup>40</sup>, se le fue sumando otra, tal vez más decisiva en las vidas y sociedades del siglo venidero, y que venía a regirse por el contrario por tecnologías denominadas de *corrientes débiles*: la radioelectricidad y la electrónica. La identificación de la unidad mínima eléctrica, el electrón, sería la pieza clave sobre la que se edificaría gran parte de la ciencia y la tecnología del futuro, incluida la imagen técnica de nuestros días.

### **2.3. Fotografía y electricidad en las artes gráficas.**

Hoy día, imagen y comunicación son dos términos indisolubles. La industria reprográfica y de los medios de comunicación se sustenta cada vez más en este binomio. Tras siglos de predominio de la palabra -prácticamente desde la invención del alfabeto- la imagen ha pasado a ocupar un puesto de igualdad -si no de mayor protagonismo- junto al texto en el ámbito de la comunicación; especialmente, en aquella que generan los medios electrónicos. Para muchos puristas, procedentes del ámbito de la comunicación audiovisual, de la fotografía o de la dirección cinematográfica, la imagen técnica impone por sí misma un lenguaje de expresión y comunicación propio que trasciende y se aparta de aquel otro que nace de los textos. Una fotografía que necesita un pie de foto para ser entendida, una película que recuerde teatro filmado, o un spot de televisión que pudiera sin más ser radiodifundido, se considerarían un craso error y una ofensa a la esencia de este nuevo lenguaje, que debería estar, según ellos, sustentado exclusivamente por imágenes. Esta omnipresencia de la imagen en la sociedad actual obedece en gran parte a la necesidad que ha sentido la humanidad desde tiempos remotos de acompañar los textos con imágenes, especialmente la de aquellos cronistas y escritores que precisaban descripciones en detalle de lo que habían visto o investigado, como era el caso de historiadores, viajeros y científicos.

Hasta la llegada de la fotografía puede decirse que la representación de los fenómenos naturales y las copias de originales, ya fueran esculturas, pinturas o cualquier tipo de objeto como máquinas o instrumentos, contenía un alto grado de arbitrariedad, subjetivismo e imprecisión. Con el dibujo y sus técnicas afines, que representan las primeras formas históricas de hacer visible o de apoyar con imágenes los argumentos, descripciones o instrucciones escritos, el alejamiento de los modelos o de la realidad era algo muy frecuente. Plinio el Viejo, en su *Historia Natural*, nos cuenta cómo en el siglo I de nuestra era, los intentos por acompañar los textos científicos con dibujos resultaron infructuosos debido a la falta de pericia de los artistas y a la falta de contacto directo con los modelos originales.

*Además de éstos (los escritores latinos), hay algunos escritores griegos que se han ocupado de este tema (la botánica)... Entre ellos, Crateuas, Dionisio y Metrodoro adoptaron un método de descripción muy atractivo, aunque ha servido para poco más que para probar las notables dificultades con que tropezaron. Su plan consistía en delinear las diversas plantas en colores, y después añadir una descripción escrita de sus propiedades. Sin embargo, las imágenes son muy susceptibles de inducir a error, especialmente cuando se requieren tantos colores para imitar a la naturaleza con cierto éxito; además, la diversidad de copistas de las pinturas originales, y sus distintos grados de habilidad, aumentan muy considerablemente las probabilidades de perder el necesario grado de similitud con los originales... (Capítulo 4, Libro 25)<sup>41</sup>*

La llamada de atención de este texto no recae exclusivamente sobre la incapacidad o ineptitud que estos artesanos pintores demostraron con sus obras, sino en las propias limitaciones del lenguaje hablado y escrito a la hora de registrar, describir y, sobre todo, para comunicar los resultados procedentes de las observaciones. Las palabras, por sí solas, no pueden conseguir descripciones totales, claras y fidedignas de los fenómenos observados, una deficiencia que se hace notar con más intensidad a medida que la ciencia, las comunicaciones y las formas de producción avanzan y exigen un grado mayor de exactitud en la información, en el registro o memoria, y en la transmisión de documentos, tanto escritos como gráficos. En la misma medida que la perspectiva hizo acto de aparición en el siglo XV para cubrir una demanda real de la sociedad de una nueva forma de representación más racional del espacio, acorde con los nuevos tiempos; y en la misma medida que la imprenta moderna apareció en este mismo siglo para agilizar la difusión y transmisión del conocimiento, así también las imágenes impresas, que acompañaron las primeras tiradas de libros ilustrados en este siglo, y que tuvieron su continuidad en el actual panorama iconográfico, vinieron a cubrir una necesidad latente de la sociedad del momento. Las nuevas clases sociales, surgidas en torno a las nuevas ciudades, ocupadas en nuevas profesiones y oficios, demandaban más dibujos e ilustraciones en las cada vez más numerosas publicaciones, muchas de ellas técnicas. Era preciso conocer de primera mano qué apariencia tenían las obras de arte, las herramientas y utensilios que se utilizaban en multitud de nuevos oficios, las plantas y los animales que comenzaban a ser conocidos en los viajes intercontinentales, los edificios de otras e importantes ciudades, etc., algo que los textos no podían cubrir fidedignamente con sus explicaciones.

Hasta mediados del siglo XV, la estampación de imágenes junto a los textos se venía haciendo de forma manual y artesanal, en ejemplares únicos e irrepetibles o, como mucho, en tiradas reducidas y para un público selecto. Normalmente se

trataba de láminas o páginas de libros que representaban algún motivo religioso como forma de ilustrar alguna oración o algún texto breve. Con la llegada de la impresión mecanizada de textos por tipos móviles, la estampación de imágenes entró también en una nueva dimensión. La edición de libros por medio de la imprenta moderna comenzó a incorporar xilografías y grabados en planchas de metal junto a los textos, al ritmo que le impuso la apertura constante de nuevas imprentas por toda Europa. A partir de 1460, tan sólo unos años después de la aparición de la imprenta de Gutenberg, se publicaron libros como el *Edelstein*, un libro de cuentos, o el *Meditaciones* de Juan de Torquemada, libro de oraciones, ambos con numerosas ilustraciones por medio de la técnica xilográfica. A los pocos años, fueron apareciendo numerosas publicaciones con ilustraciones de carácter informativo como fueron manuales de maquinaria, herbarios y crónicas de viaje<sup>42</sup>.

Fueron los distintos oficios de tallistas, pintores, plateros, orfebres y armeros los que desarrollaron a lo largo del siglo XV estas técnicas de grabación en sus tres modalidades más extendidas: la xilografía, y el grabado en plancha de metal, bien al buril o al aguafuerte. Probablemente Gutenberg fue uno de estos artesanos orfebres<sup>43</sup>. La xilografía en relieve, hecha en tacos de madera, es la técnica de grabación más antigua que se conoce, encontrándose sus orígenes en diversas civilizaciones, desde la Mesopotamia a Oriente. Las primeras xilografías que se conocen en Europa son del siglo XIV y representan estampas religiosas o naipes. El relieve en metal comenzó a practicarse un siglo más tarde, y se llevó a cabo agujereando el metal mediante punzones; sin embargo, la dureza del metal y la tosquedad de los resultados aconsejaron otros procedimientos como la calcografía, que se lleva a cabo mediante el proceso contrario: la impresión en hueco. Esta técnica adquirió unas dimensiones industriales a finales del siglo XIX, dando lugar al *huecograbado*, una de las técnicas más utilizadas por la industria gráfica, especialmente para grandes tiradas. Dentro de la impresión en hueco o talla en plancha de metal, se desarrollaron dos procedimientos básicos: el grabado al buril, rayando directamente el metal con este instrumento, y el grabado al aguafuerte, consistente en dibujar directamente sobre la plancha, que ha sido recubierta previamente con un barniz protector. La posterior inmersión de la plancha en un baño ácido provoca la entalladura sólo de las partes dibujadas, que son las que el ácido corroe o *muerde* en el metal.

Con estas técnicas se cubrió en parte la necesidad que la sociedad en general y más en particular la de los científicos y artistas tenían de acompañar los textos con imágenes. El propio Leonardo echó en falta las ilustraciones en la explicación que daban los manuales de algunos procesos fisiológicos, entendiendo que podrían ser explicados de un plumazo con el uso de alguna imagen. En el dibujo de un corazón humano escribió:

*¿Cómo puedes describir este corazón en palabras sin llenar un libro entero?*<sup>44</sup>

Podemos entender perfectamente cómo la demanda de imágenes en los libros vino principalmente de la mano de un nuevo colectivo social formado en esta época por artesanos de nuevos y más sofisticados oficios, científicos o alquimistas, viajeros, y un público nuevo que accedía al libro, entre otras razones, por ser editado por primera vez en tiradas más numerosas y en formatos más pequeños. Hay que tener presente que, hasta entonces, los libros eran objetos de dimensiones considerables, diseñados para un uso común dentro del ámbito de la corte, las iglesias y los monasterios, y para ser leídos normalmente en voz alta, lo que hacía superfluo la incorporación de imágenes.

*Un aspecto importante de la relación social y comunitaria con el libro medieval era el fenómeno de la lectura en voz alta; una costumbre que parece remontarse a la antigüedad romana, cuando la lectura de un volumen situaba a la obra en el contexto de una tradición aún más antigua, la de la literatura oral, de la que se sabían herederos.<sup>45</sup>*

Desde estas fechas hasta la aparición de la litografía en 1797 las formas de grabación fueron primordialmente por medio de la xilografía, al buril y al aguafuerte, y si sufrieron múltiples modificaciones y mejoras con el tiempo, en líneas generales, se atuvieron al uso de dos materiales, la madera y el metal, y a dos procedimientos básicos, el relieve y el hueco. Normalmente, el proceso de presentar conjuntamente textos e imágenes en tiradas numerosas se complicaba, ya que era imposible grabar directamente los dibujos en la misma plancha donde iban los textos. El alejamiento del original era también moneda común, representando un serio inconveniente en las obras de carácter técnico. Las representaciones de fauna o botánica, por ejemplo, que acompañaban las descripciones hechas por los viajeros, o la de aquellas obras de arte que habían sido observadas o expropiadas en tierras lejanas, y de las que se contaba con una vaga descripción o con un simple boceto, sufrían modificaciones constantes cada vez que un dibujante interpretaba los datos o las copias disponibles. La *copia de copia* se convirtió en todo un arte en el que la inventiva y la imaginación de los dibujantes plasmada en los grabados, llevaron en más de una ocasión a malinterpretaciones, especialmente en el ámbito de la crítica de arte de épocas posteriores, que necesariamente se fundamentaba en este tipo de material. Las estampas, en general, daban una vaga idea de la composición y encuadre de los objetos, cubriendo las necesidades de un gran público, pero prestaban un mal servicio a las necesidades de científicos e historiadores.

### **2.3.1. La litografía**

La llegada de la litografía, de la mano de Aloys Senefelder en 1797, supuso un salto cualitativo en la impresión gráfica que ya por entonces gozaba de una gran popularidad y configuraba una gran industria y mercado. Esta nueva técnica planográfica permitió tiradas masivas respetando las formas de representación originales de los autores, y con la posibilidad de estar impresas en color.

A diferencia del aguafuerte o del grabado al buril en madera o metal, que, como vimos, imprimen a partir de tallas o de relieves hechos en la plancha, la litografía lo hace de forma plana, basándose en la incompatibilidad del agua y los distintos tipos de barnices y grasas. Con el tiempo han proliferado multitud de técnicas litográficas, pero el procedimiento básico consiste en la utilización de una piedra porosa en la que penetra la grasa de la tinta o del lápiz graso, y el agua que será la encargada de delimitar la parte donde no hay dibujo. La fijación de la imagen se lleva a cabo por medio de una solución ácida que contiene goma arábica, que es el elemento que endurece y da consistencia al dibujo. Por último, la estampación propiamente dicha se hace mediante el entintado de la plancha y el contacto directo, y a presión, con el papel, con la ayuda de un tórculo o una prensa. En este proceso, la tinta sólo se adhiere a aquellas partes donde reside la grasa, que se corresponden con el dibujo realizado.

Así como Durero, Mantegna, o Rembrandt fueron verdaderos maestros de la xilografía y del aguafuerte tradicionales, la litografía animó a otros artistas de la



época, como Daumier y Goya, a utilizar esta novedosa técnica reproductiva. El pintor aragonés ya había ejercitado con maestría el aguafuerte y la aguatinata. Esta última técnica, aparecida como la litografía a finales del XVIII, es una variación del aguafuerte pero con notables mejoras en la reproducción de los medios tonos. Con ambas técnicas realizó sus series de *Los caprichos*, *Los desastres de la guerra*, *Tauromaquia* y *Los disparates*. Ya anciano probó suerte con la litografía, de la que dejó contadas láminas, algunas de ellas ejemplares, especialmente de su época en Burdeos (Fig. 2.18). Tanto el conjunto de la obra gráfica de Goya, como las numerosas litografías de Daumier, al modo de viñetas, ilustraciones, tiras cómicas y satíricas, muchas de ellas en color, y publicadas en los periódicos de la época, son muestras de un arte en el que se conjuga un retrato costumbrista de la sociedad del momento con pinceladas de un realismo fantástico y ensoñador.



Fig. 2.18. *La vieja hilandera*, 1819. Francisco de Goya. Litografía a la pluma.



Fig. 2.19. *Entrada del gran tunel de un ferrocarril*. (Detalle) 1849. H. Daumier. Litografía de Delaunoy en "La Caricature".

Ambas creaciones trascienden el puro valor estético que toda obra de arte conlleva para convertirse en representaciones documentales, unas veces ingeniosas y llenas de humor, otras veces brutales y desgarradoras, del momento histórico por el que atravesaba Europa en aquellos años convulsos de guerras y revoluciones. Tanto las caricaturas y escenas urbanas de Daumier (Fig. 2.19.), como el retrato de las costumbres populares, de los estragos de la guerra o de las fantasías premonitorias de Goya, dejan entrever todo el potencial que posteriormente asumirá la fotografía documental y el fotoperiodismo.

Hasta la llegada de la litografía, normalmente el proceso de grabación se hacía en diferentes etapas, como partes de distintos oficios. Los grabadores, por entonces, se habían convertido en un gremio numeroso y poseedor de una técnica y destrezas muy refinadas. Por lo general, tenían que circunscribirse al dibujo que les facilitaba el artista, a veces haciendo uso de la calcografía, otras veces haciendo versiones sobre meros bocetos existentes, y en muy contadas ocasiones a partir del dibujo que los artistas hacían sobre la propia plancha de grabación. Una vez terminado el dibujo, comenzaban a grabar con la ayuda de gubias, agujas de punta, escoplos, buriles, punzones u otros utensilios, aplicando diferentes

técnicas, tales como rayar, escoplear, puntear, rascar, etc., y siguiendo una serie de pasos muy precisos a fin de conseguir los efectos de sombreado, volumen, contorno, o contraste. El resultado de su trabajo era la plancha de impresión, que se ponía a disposición de los estampadores, iniciándose entonces el proceso de reproducción con la ayuda de las máquinas impresoras. Hasta bien entrado el siglo XIX, la mayoría de las prensas seguía siendo accionada manualmente, lo que requería una fuerza física considerable por parte de los estampadores. Es a partir de los años treinta cuando comienza a producirse de forma paulatina una mecanización más completa del proceso, primero mediante maquinaria accionada por vapor, y más tarde con la incorporación de artilugios mecánicos como rodillos



y cilindros de impresión. Todo ello redundó en mayores tiradas y en aliviar el esfuerzo físico de los estampadores. La entrada de los motores eléctricos para impulsar las máquinas de impresión tuvo que esperar hasta finales de ese mismo siglo. Por tanto, el aspecto artesanal de estas técnicas y la intervención de varios estamentos y oficios en el proceso de estampación se mantuvo durante mucho tiempo, con la consiguiente pérdida de fidelidad respecto de las obras originales. La litografía, en este sentido, consiguió una mejora notable al permitir una mayor participación de los dibujantes y de los artistas en el proceso de grabación, ya que podían plasmar sus dibujos directamente y sin dificultad sobre la plancha, asegurándose de que la impresión final fuera totalmente fiel a sus intenciones. Otra cuestión era cuando se trataba de reproducir obras pertenecientes a otros períodos históricos, u objetos, utensilios, edificios, motivos de botánica o fauna, catálogos de instrumentos, de armas, mobiliario, joyas, piezas de museos, etc., a los que se tenía un nulo acceso, o de los que apenas se contaba con una copia de calidad. Este tipo de reproducciones, que representaba buena parte del mercado de las estampas durante el siglo XVIII y principios del XIX, experimentó una demanda creciente que sólo la fotografía y la fotomecánica pudieron satisfacer.

Los procesos industriales de impresión por medios litográficos buscaron también su apoyo en las nuevas técnicas fotográficas a medida que avanzaba el siglo, recibiendo esta alianza la denominación de procesos *fotolitográficos*. Sus antecedentes más directos se encuentran en los primeros intentos del propio Nicephore Niépce por obtener impresiones mediante la aplicación de resinas fotosensibles a las piedras litográficas. Fue en una de estas pruebas, concretamente al utilizar betún de judea sobre planchas de metal, donde encontró el camino para conseguir las que están consideradas primeras fotografías de la historia, o *heliografías*, como él prefirió llamarlas. Sin embargo, la *fotolitografía* como tal, no salió a relucir hasta 1852, con las primeras obra publicadas en París por la asociación de Lemercier, Lerebours, Barreswil y Davanne. Lemercier fue un famoso litógrafo que se asoció con Lerebours, un óptico especializado en aparatos fotográficos, y con otros dos socios, ambos químicos y con un gran interés por la fotografía. Prácticamente, comenzaron su trabajo donde Niepce lo dejó, impregnando piedras litográficas con asfalto que exponían a la luz junto a un papel negativo. Luego lavaban la piedra con aguarrás, quedando lista para estampar por el método litográfico convencional. En 1853 publicaron una edición dedicada a la arquitectura de numerosas ciudades mediante esta técnica, siendo ésta la primera publicación en la que se consiguió reproducir los medios tonos con la combinación de métodos litográficos y fotográficos<sup>46</sup>. Dos años más tarde, Poitevin sustituyó el asfalto por la albúmina bicromatada, lo que mejoró y facilitó sustancialmente el proceso, al requerir menos tiempo de exposición y poderse lavar las planchas con agua. Algunas de estas fotolitografías, grabadas por él y estampadas por la mano experta de Lemercier, están consideradas entre las mejores de su género. La técnica de la fotolitografía se utilizó en numerosas ocasiones en combinación con el colotipo, especialmente para la reproducción de mapas, planos, bocetos de dibujo, etc., dado su bajo coste y rapidez de procesamiento.

La litografía fue una técnica en continua evolución a lo largo del siglo XIX, con un gran éxito comercial gracias a su facilidad para imprimir en color. En la segunda mitad del siglo proliferaron las ilustraciones en color en libros, programas de mano, folletos y en carteles publicitarios, donde destacaría la labor de pintores como Toulouse-Lautrec o Alphonse Mucha, o de cartelistas como Jules Chéret. A su vez, en fechas tan tempranas como 1853, John Strather presentó la primera patente del procedimiento *offset*, una variedad del método litográfico, que con el tiempo gozaría de una gran aceptación en la industria y el mercado, llegando a ser uno de los métodos más utilizados en artes gráficas hasta nuestros días.

### 2.3.2. La irrupción de la fotografía en las artes gráficas.

Con la llegada de la fotografía puede decirse que comienza un nuevo período histórico dentro de las artes gráficas, al combinarse las técnicas existentes de grabación y estampación con las nuevas posibilidades que vino a aportar esta nueva técnica, fundamentalmente al convertir la luz en el elemento esencial del proceso. Existe incluso una etapa de transición en la que no están bien delimitadas todavía las fronteras entre el grabado tradicional y la fotografía, y en la que ambas técnicas van a convivir dando lugar a fórmulas mixtas y a múltiples experimentaciones. Muchos de estos ensayos comenzaron por utilizar la propia placa fotográfica como plancha de grabación. Se dibujaba o rayaba directamente sobre la emulsión con la ayuda de un punzón fino, y luego se procesaba la placa siguiendo los pasos tradicionales de la fotografía, procedimiento que permitía hacer tantas reproducciones como se quisiera. Esta nueva forma de creación de imágenes, que eludía también la intervención del grabador profesional, fue ensayada de forma experimental por pintores como Corot, Delacroix y Millet. (Fig. 2.20). Otro intento en este sentido fue por medio de daguerrotipos que eran grabados al aguafuerte, lo que recibió en su día el nombre de *huecograbado*, entre los que hay que destacar los realizados por

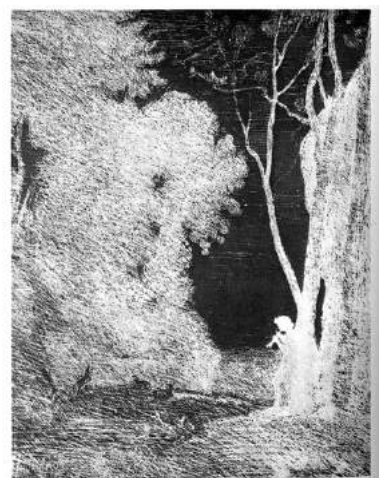


Fig. 2.20. *Le Petit Berger*. Placa de colodión rayada con buril, hacia 1858. Camille Corot.

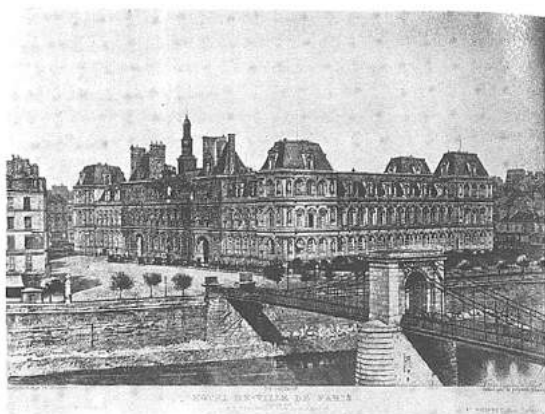


Fig. 2.21. Grabado al daguerrotypo, 1842. H. Fizeau

el físico H. Fizeau (Fig. 2.21). Es preciso, sin embargo, diferenciar este denominado huecograbado del huecograbado industrial, tal como lo conocemos hoy día, técnica que se impuso de forma masiva a partir de finales del siglo XIX. Otro ensayo de interés fue el que dio lugar a la técnica de la *fototransparencia*, inventada por Thomas Bolton hacia 1860. Consistía en sustituir el dibujo que normalmente se adjuntaba al taco de madera de la xilografía, por una fotografía que era la que servía de modelo al dibujante, y para crear una imagen negativo en el mismo taco, previamente sensibilizado. (Fig. 2.22).

La entrada de la fotografía en las artes gráficas supuso un salto cualitativo determinante en la historia de la reproducción gráfica, ya que fue la primera vez que se prescindió de la libre interpretación del dibujante. Podemos imaginar la magnitud e importancia que tuvo esta innovación si prestamos atención a revistas ilustradas del XIX, como *The Illustrated London News* o *La Ilustración Española e Hispanoamericana*, tan importantes para los documentalistas gráficos de nuestros días, y observamos el paso de un tipo de estampación a otro. Las diferencias en las formas, el encuadre, la composición, el uso de la perspectiva, las miradas de los modelos a cámara, etc., son más que manifiestas cuando el grabado era producido a partir de un dibujo o de una fotografía. Sirvan de ejemplos estos dos grabados de finales de siglo que representan escenas de emigración hacia el *nuevo mundo* (Fig. 2.23 y 2.24), en los que se pone de manifiesto la presencia o





**Fig. 2.22.** Xilografía de T. Bolton según un relieve. Grabado mecánico por procedimiento fotográfico.

que bien habían presenciado con sus propios ojos el acontecimiento en cuestión, o bien habían recibido una ligera explicación del mismo por parte de testigos presenciales; de esta manera, los dibujantes de la redacción tenían que ingeniárselas para poder ilustrar lo mejor posible este tipo de noticias a partir de ese exiguo material. La incorporación de la fotografía a las técnicas de reproducción gráfica supuso todo un hito en esta industria y en la difusión del conocimiento. Para hacernos una idea concreta de la verdadera dimensión de este fenómeno tan sólo es preciso imaginar con qué ojos se recibieron las primeras estampas de obras de arte en la que se reproducían copias fidedignas de los originales, procedentes de cualquier parte del mundo. A partir de 1847, por ejemplo, se imprimieron con la técnica del



**Fig. 2.24.** Buscando patria (Emigrantes a bordo) 1893.. Cuadro de R. Romero de Torres De fotografía de D. Nicolas Caldevilla. La Ilustración.

ausencia de la cámara fotográfica en el proceso de producción de los mismos. Y señalar de paso, cómo este tipo de escenas relativas a las vidas de los grupos sociales más desfavorecidos, no sólo en el ámbito de la emigración sino del trabajo industrial, o de sus quehaceres cotidianos en las grandes ciudades, fue recogido casi con exclusividad por el grabado y la fotografía, cuando son contados los lienzos que retratan este tipo de experiencias y situaciones. Este hecho apoya en gran medida la tesis de que el patrimonio iconográfico de los grupos sociales, o incluso de los países, guarda una relación directa con su nivel adquisitivo, algo que los documentalistas gráficos conocen fehacientemente.

Antes de la incorporación de la fotografía a las artes gráficas, las redacciones de las revistas recibían los bocetos o apuntes de los cronistas repartidos por el país o el mundo,



**Fig. 2.23.** Salida de emigrantes irlandeses, 1881.

calotipo cuatro volúmenes sobre la historia de la pintura española, *The Annals of the Artists of Spain*, de William Stirling <sup>45</sup>, con los que el público europeo pudo conocer por primera vez y de primera mano la obra de los más renombrados pintores españoles (Fig. 2.25.). Aunque se trataba obviamente de reproducciones en blanco y negro, la diferencia con los anteriores métodos en los que primaba la libre interpretación o las destrezas personales de los dibujantes, fue más que evidente. En honor a la verdad hay que decir que la propia invención de la fotografía se debe a este deseo de facilitar el trabajo de los grabadores de la época y de salvar este tipo de malinterpretaciones presentes en las ilustraciones; es por lo que la fotografía puede ser considerada, en sus orígenes, parte integrante de las artes gráficas. Si bien es cierto que científicos como Seebeck, Wedgwood, Davy o Herschel, ya investigaban sobre las diferentes reacciones que presentaban las sales de plata ante la luz mucho antes de la aparición de la fotografía, fueron los intentos por encontrar una

nueva forma de estampación litográfica más fácil y automática los que condujeron de forma directa a su descubrimiento. Joseph Nicephore Niépce fue el primero en conseguir impresiones fotográficas en este sentido y el que con la invención del método del *heliograbado* puede ser considerado el padre de la fotografía.<sup>48</sup> Sus primeros pasos por conseguir un medio de reproducción fotomecánica que superara la fase estrictamente manual de estos procesos datan de 1816.<sup>49</sup> Sin embargo, se tuvo que esperar diez años para conseguirse un resultado práctico y fijado de modo permanente, en la forma de un heliograbado que aún se conserva en el museo dedicado a este inventor. Para expresarlo en términos actuales, este primer *fotograbado* se consiguió fotografiando por contacto un grabado convencional que representaba la figura de un cardenal, con el fin de que sirviera como patrón de nuevas reproducciones (Figura 2.26). La sustancia fotosensible que Niépce utilizó fue el betún de judea disuelto en aceite de lavanda, mezcla que luego se esparcía sobre una plancha de peltre: una aleación de zinc, plomo y estaño.



Fig. 2.26 Heliograbado de 1826. De J. N. Niépce.

obstante, seguía tratándose de un proceso muy artesanal, que requería de una fuerte participación y habilidad de los grabadores. La captación de la escena se llevaba a cabo de forma automática, pero el paso de las imágenes resultantes a las planchas de acero para su estampación exigía bastante tiempo y dedicación de los artistas. Por ejemplo, la reproducción final de los diferentes tonos de gris se tenía que hacer por medio del trazado de líneas más o menos apretadas y de diferentes grosores, como puede observarse en el detalle de la puerta y de algunas ramas del grabado de Fizeau<sup>50</sup> y el resultado no siempre era muy nítido o rico en tonalidades (Fig.2.27). El tintado de las planchas resultantes también presentaba numerosas complicaciones, especialmente a la hora de eliminar la tinta sobrante, o de poder



Fig. 2.25. Copia de un grabado. Velázquez. La rendición de Breda. Anales de artistas españoles. William Stirling. Copia de 1947.

Esta fue una de las razones por la que la llegada del daguerrotipo en 1839, de la mano de Louis Jacques M. Daguerre (1787- 1851), atrajo la atención de los grabadores y de los hombres de ciencia. La calidad de sus reproducciones estaba muy por encima de cualquier forma de grabado existente hasta la fecha y pronto se reparó en su fácil adaptabilidad a los procesos de estampación y en su capacidad para ser impresa en diferentes tipos de superficies. Habitualmente, el daguerrotipo se llevaba a cabo sobre una superficie de cobre bañada en una sustancia semitransparente y resinosa, que servía de base para la posterior grabación a mano de la imagen allí presente. El proceso solía completarse con la técnica al aguafuerte, tal como vimos en los *huecograbados* de Fizeau, y en algunas ocasiones concluía con una fijación por medios eléctricos, normalmente por galvanoplastia. No

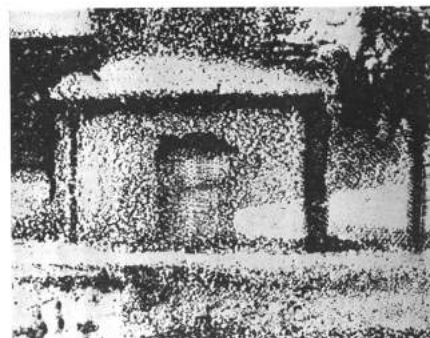
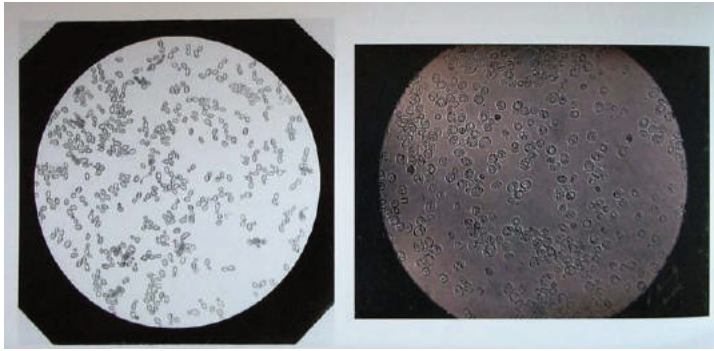
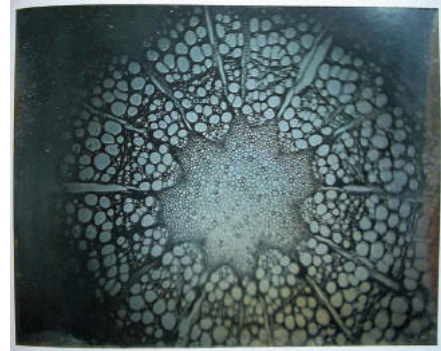


Fig. 2.27. Detalle ampliado de la fig. 2.21.



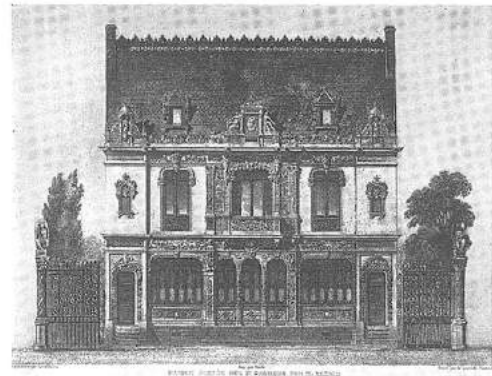


*Fig. 2.28. Glóbulos fermentados de levadura de cerveza, 1845. Leon Foucault y Alfred Donné. Ampliación de 400 x. Del Atlas de cours de microscopie complementaire des etudes medicales.*



*Fig. 2.29 Corte de Climatis, 1840. Andreas Ritter. Fotografía hecha con un microscopio solar, daguerrotipo.*

reutilizar las planchas ya utilizadas. Tanto Alfred Donné en París, como Josef Berres en Viena o Andreas Ritter en Alemania, comenzaron en estas fechas tan tempranas a utilizar estas técnicas para la reproducción de sus trabajos científicos de microscopía (Figs. 2.28 y 2.29). El mismo Fizeau empleó técnicas de galvanoplastia al oro en el proceso de deposición de diferentes sustancias en las planchas, consiguiendo mejorar la técnica de fijación de las altas luces. En el paso final, el daguerrotipo se galvanizaba normalmente en cobre, mediante una o más aplicaciones con el fin de conseguir una plancha de impresión más duradera. La presencia de la mirada fotográfica se deja ya entrever en estas primeras formas de *fotografados al daguerrotipo* cuando lo comparamos con aquellos en los que el dibujo era el método predominante (Fig. 2.30)



*Fig. 2.30 Grabado al daguerrotipo de 1842. H. Fizeau.*

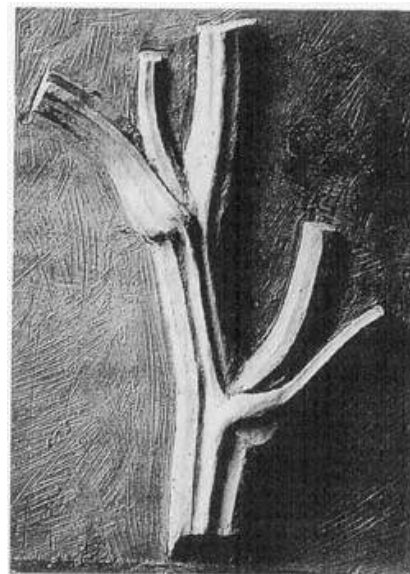
### ***2.3.3. La electricidad en las artes gráficas***

El componente eléctrico, como vemos, comenzó a hacer acto de presencia en los procesos de estampación de forma paulatina. Estas primeras técnicas comentadas, en las que los medios fotográficos se combinaron con los galvanoplásticos, coincidieron con otras formas de creación de imágenes por medios eléctricos muy en boga en la época, como la electrotipia, introducida por Moritz Hermann von Jacobi en 1837. Básicamente, consistía en reproducir moldes metálicos, normalmente del natural, caras, plantas o motivos de artesanado. Por lo general, estas *reproducciones galvanopl sticas*, tal como se dieron a conocer entonces, partían de un molde de escayola que era reproducido en cobre por medios electrolíticos, lo que facilitaba la obtención de numerosas réplicas. El proceso era lento y sofisticado, pero sirvió de inspiración a los grabadores en su búsqueda de otros procedimientos. Franz von Kobell hizo pública en 1840 la aplicación de la *electrotipia* en la reproducción de pinturas a la acuarela. Se pintaba en gran relieve con aceite vegetal y colores de porcelana en una plancha de metal que luego se galvanizaba. Esto permitía una reproducción múltiple sin necesidad de grabar el dibujo. Estas técnicas de estampación que combinaban procedimientos eléctricos y mecánicos dieron un gran impulso a la difusión masiva de obras de arte. Alois Auer empleó entre 1852 y 1853 la electrotipia para conseguir copias del natural. El modelo se moldeaba al natural en una lámina de

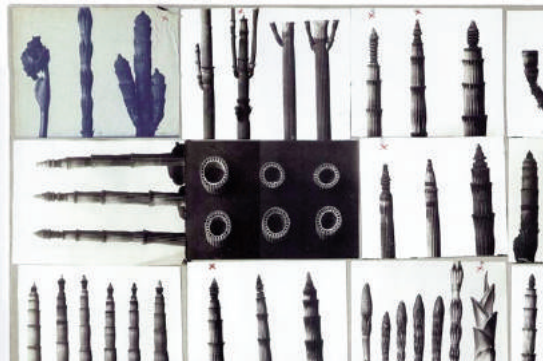


plomo y por medio de la electrotipia se sacaba una copia huecograda; luego, ésta se traspasaba a una lámina de cobre que era la que se utilizaba para la estampación, reproduciendo de forma exacta y en relieve, el modelo original. El proceso era muy caro, aunque muy popular durante la segunda mitad del XIX; además, de ser un precursor directo de la afamada *Woodburytipia*. En una primera versión, este último método conseguía la formación del relieve por electrotipia a partir de procesos fotográficos ( con una amalgama pegamentosa de colodión y gelatina), en vez de utilizar los objetos naturales directamente.

En el cruce de caminos entre las técnicas fotográficas y la fabricación de moldes escultóricos, es importante reseñar el trabajo de Karl Blossfeldt, llevado a cabo a finales de siglo en la Escuela de Artes Decorativas de Berlín. Este autor empleó técnicas macrofotográficas para retratar motivos botánicos que utilizaba para la fabricación de moldes de escayola. Estos moldes, luego, eran aplicados para reproducir por métodos galvanoplásticos, piezas ornamentales de yeso y forja. Con el tiempo, el alto valor estético de estas fotografías llamó poderosamente la atención de los historiadores de la fotografía, quienes normalmente las han presentado al público de forma individual y reencuadradas, despojándolas de su verdadero sentido (Figs. 2.31 y 2.32)



*Fig. 2.31. Fotografía del trabajo de un estudiante, basado en fotografía de tallos de Karl Blossfeldt. h. 1920.*



*Fig. 2.32 Puntas de Colas de caballo. I Placa. Láminas de trabajo de Karl Blossfeldt.*

La impresión de grabados a partir de daguerrotipos sometidos a la acción eléctrica abrió un rico campo de experimentación durante algunos años. El propio Daguerre inició investigaciones a partir de 1839, destinadas al estudio de la acción de la electricidad en los daguerrotipos; concretamente, activando corrientes en las placas en el momento de su exposición. Estaba convencido de que los efectos fotosensibles aumentarían de este modo, algo que no llegó a suceder. Fue Edmond Becquerel quien dio un paso más en esta dirección, al aplicar leves destellos eléctricos sobre daguerrotipos, lo que en cierta manera constituye un principio de lo conocido posteriormente como *electrografía*. Definitivamente, la producción de imágenes daguerrotípicas por medios eléctricos como tal vino de la mano de W. B. Grove. este autor presentó en 1841 un procedimiento consistente en que el daguerrotipo hiciera las funciones de ánodo en un baño electrolítico, para lo que era necesario proteger su reverso y los bordes con goma laca. El resultado final se obtenía al lograr que el fenómeno de la electrolisis afectara de una forma desigual a la plata y al mercurio presentes en la placa. Ese mismo año, Edouard Baldus cubrió planchas de cobre con asfalto fotosensible, grabadas también por medios electrolíticos. Alphonse L. Poitevin, conocido principalmente por la invención del colotipo en la década de los cincuenta, y de otros procedimientos fotográficos a base de pigmentos, albúmina bicromatada y aceites, también investigó a partir de 1848 la relación entre la electricidad y el daguerrotipo, descubriendo, a la par que Pretsch, un procedimiento que denominó "*galvanografía*" o "*fotogalvanografía*". Para ello,

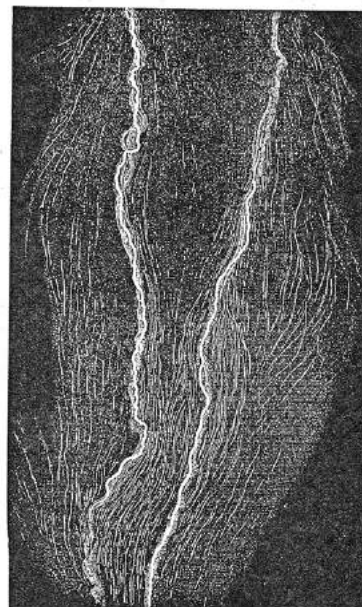
utilizó daguerrotipos y planchas de metal bañadas en oro. Dos años más tarde, Firmin Gillot, impulsor destacado de las técnicas fotomecánicas y uno de los impresores de láminas más afamados de la época, ensayó también con planchas de zinc embadurnadas con betún de judea, que grababa por medio de baños galvánicos.

Sin embargo, la *fotogalvanografía*, en un sentido práctico y comercial, llegó de la mano de Paul Pretsch. Tomando como punto de partida los trabajos previos de Kobell, logró aplicar las técnicas fotográficas en substitución de lo que hasta entonces se venía haciendo de forma manual. Ya vimos cómo Kobell dibujaba con un pincel directamente sobre una placa de cobre cubierta de un baño de plata, y cómo luego la sumergía en un baño galvánico para obtener así una figura en relieve que se podía utilizar como plancha de impresión. Pretsch logró que este proceso manual se hiciera por medios fotográficos utilizando goma bicromatada (bicromato potásico), que era inflada en un baño de agua fría de acuerdo con la técnica de Talbot. Posteriormente reemplazó la goma bicromatada por la gelatina bicromatada. En 1850, la Oficina de Estampaciones del Gobierno Austriaco, que ya utilizaba en sus impresiones tanto el calotipo de Talbot como el colodión húmedo, encargó a Pretsch que pusiera en práctica esta nueva técnica, bautizada ya de forma oficial como *fotogalvanografía*. Años más tarde, en 1855, este impresor estableció en Inglaterra su propia compañía dedicada a imprimir, ya de forma totalmente mecanizada y con la incorporación de técnicas fotogalvánicas, publicaciones dedicadas a la difusión del arte y la fotografía documental. Entre ellas, cabe destacar la colección *Photographic Art Treasures*, o colaboraciones tan significativas como las del fotógrafo Roger Fenton, afamado por sus reportajes gráficos sobre la guerra de Crimea. Posteriormente, en 1862, Pretsch presentó una técnica propia para impresiones tipográficas, a base de goma bicromatada y electrotipia, en parte presionado por la preferencia que la industria comenzaba a mostrar por la técnica del fotograbado de Talbot y por la de “*medios tonos*”, que no requerían tantos retoques manuales. La fotogalvanografía, con el tiempo, quedó relegada a trabajos de reproducción de mapas y similares, prefiriéndose la nueva técnica de Talbot para impresiones que precisaban de una mayor fineza y detalle en sus imágenes.

Por su parte, Baldus, que se mantuvo en su línea de investigación con el asfalto, empleó este mismo año la técnica utilizada por Niépce de Saint Victor, en la producción de copias en cobre, utilizando un baño galvánico como elemento grabador en vez del ácido. Colocó en el polo positivo de una batería galvánica, inmersa en una solución de sal, la plancha de cobre que contenía un grabado a la aguatinta impreso sobre un granulado de betún de judea. De este modo, consiguió disolver el metal y grabar a un mismo tiempo. Este procedimiento le ayudó también a controlar la intensidad de los medios tonos pintando directamente sobre las zonas que así lo requerían; o a graduar la fuerza de la grabación con la distancia con la que la plancha era colocada respecto de los electrodos.

En torno a estas fechas, fueron numerosísimas las investigaciones encaminadas a fotografiar los efectos producidos por las descargas eléctricas, tanto las producidas en el ambiente exterior por medio de máquinas de inducción, arcos eléctricos, o relámpagos, como las originadas en el interior de los primeros tubos de vacío. En este sentido, a los múltiples ensayos de Becquerel, comentados en páginas anteriores, se añadieron los de Julius Plücker, uno de los científicos precursores en la utilización de los recién llegados tubos de vacío de Geissler, y los de otros muchos científicos atraídos por estos trazados arborescentes que tanto recuerdan las figuras de Lichtenberg<sup>51</sup> y las fulguritas o trazados naturales que los rayos marcan en las rocas y en las cavidades del terreno (Figs. 2.33 y 2.34).

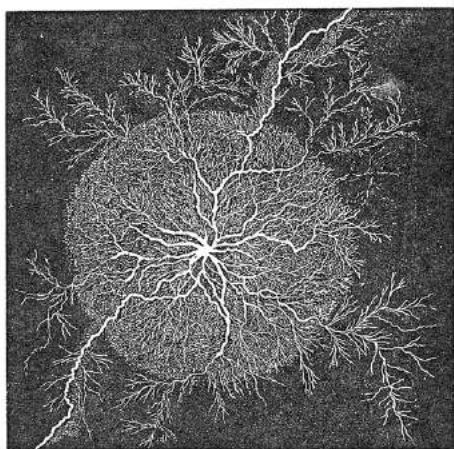
Basándose en los trabajos de Pretsch, Bentley Woodbury desarrolló a partir de 1866, la nueva *Woodburytipia* o *fotogliptia* (Woodburytype o photoglypty). Esta nueva modalidad de estampación prescindió del método de la electrotipia y pasó a utilizar prensas hidráulicas y láminas de plomo, técnica que redundó en la obtención de un tipo de fotograbado monocromático con una mejora notable en la reproducción de los medios tonos y con una ausencia total de grano. El relieve se obtenía por medio de un compuesto de gelatina y tinta china resistente a la presión mecánica y a la acción química, y se imprimía a partir de un negativo de tono continuo, lo que redundaba en la reproducción óptima de los medios tonos. Seis años más tarde, consiguió realizar reproducciones fotográficas por medio de cilindros, adelantándose de este modo a las primeras impresiones de tipo rotatorio. Aunque los resultados eran de una extraordinaria calidad, esta técnica presentaba la limitación de ser lenta y no permitir la impresión de las láminas junto a los textos, algo que pronto se iba a conseguir con técnicas inspiradas en los trabajos de Fox Talbot, más concretamente con su huecograbado por tramas.



*Fig. 2.33. Descarga producida por una bobina de Rhumkorff. Ducretet (fotograbado)*

#### ***2.3.4. La impresión por medios tonos. El huecograbado tramado.***

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, las técnicas de grabación y de impresión en la industria de las artes gráficas, aunque muy diversas en cuanto a sus formas y resultados, quedaron definidas por tres procedimientos básicos, que perduran en gran medida hasta nuestros días. En primer lugar, se encontraban las fórmulas tradicionales del grabado manual en planchas de madera o de metal, con la ayuda del buril, de la punta seca o del aguafuerte, que daban lugar a dos formas básicas de impresión: el grabado en relieve y el huecograbado. Y por otro lado, se contaba con la litografía y sus derivados, que constituían las denominadas técnicas planográficas por basar sus procedimientos en la formación de imágenes sobre



*Fig. 2.34. Descarga con el dispositivo de H. Ducretet, emplazando un disco de ebonita, con contacto directo del borne eléctrico con la placa (fotograbado)*

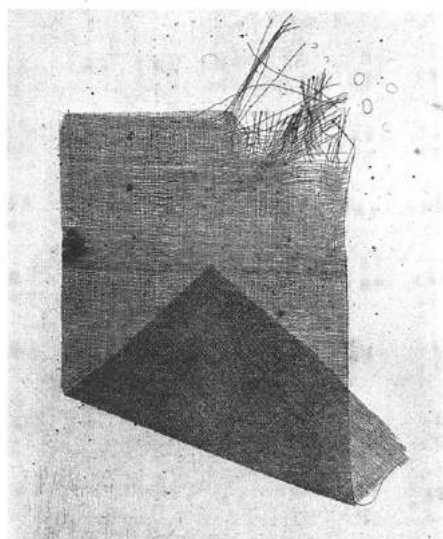
superficies planas mediante la utilización de compuestos insolubles en el agua, tales como barnices, aceites y plásticos. Estos tres procedimientos se vieron profundamente afectados por la llegada de las técnicas fotomecánicas, como resultado de la entrada en escena de la fotografía y de la progresiva mecanización y automatización de los procesos de impresión. En un principio, fue la fórmula del huecograbado la que adquirió un mayor protagonismo por ajustarse mejor a las nuevas aportaciones que trajo el fotograbado, y por su capacidad para reproducir mejor los distintos tonos. En el huecograbado, la tonalidad se consigue de forma continua, dado que la reproducción de los medios tonos se obtiene de acuerdo con la mayor o menor intensidad que presentan los puntos, algo determinado a su vez, por la presencia de más o menos tinta en



sus huecos. Por el contrario, en las técnicas de relieve, las impresiones de los tonos es discontinua, por contarse con sólo dos posibilidades: blanco y negro, hecho que obliga a que la reproducción de los medios tonos se lleve a cabo mediante la mayor o menor presencia de puntos o manchas de un color u otro por unidad de superficie. Pero la ventaja del huecogrado sobre las técnicas de relieve vino dada fundamentalmente por su adaptación a la técnica del fotograbado tramado, técnica que parte originalmente de los trabajos de Fox Talbot, concretamente del proceso fotográfico conocido como *calotipia* o *talbotipia*, inventado por este autor en 1841.

Talbot presentó dos modalidades de fotograbado por tramas, que fueron registradas con sus correspondientes patentes en los años 1852 y 1858. En la primera de ellas, la imagen se producía por contacto directo de una plancha de acero con el objeto en particular que se quería reproducir, una vez que se había emulsionado la plancha con un compuesto de gelatina y bicromato potásico. El objeto debía ser preferentemente plano, tal como una pieza de encaje, tela, un cedazo como el de la figura anterior, o un motivo botánico como una ramita aplastada. El conjunto se exponía a la luz durante unos minutos y acto seguido, se pasaba a disolver las partes no afectadas por la luz, fijándose el resto mediante un baño de sal común y agua o de hiposulfito sódico. Posteriormente, se consiguió la formación de hendiduras y relieves, relativas a la imagen expuesta en la plancha, con la utilización de un compuesto ácido, normalmente de bicloruro de platino. La misma plancha resultante servía para la estampación de láminas siguiendo los pasos habituales de los grabados convencionales. El procedimiento se podía aplicar también sobre piedras litográficas o planchas de zinc.

Una variante de esta técnica, y recogida por la misma patente, es la que se conocería como *fotograbado directo o tramado*, que consiste en exponer dos veces la plancha emulsionada. En primer lugar, se emplaza una o más capas de alguna de estas telas urdidas con hilos, gasa o cedazo entre la plancha y el objeto, colocándolas de modo que la intersección de sus hilos forme un entramado fino de puntos, distribuidos de forma compacta y al azar (Figs. 2.35 y 2.36). Una vez retirado el tamiz o trama, se vuelve a exponer en contacto con un objeto plano o



**Fig. 2.35.** Grabado fotoglífico de Talbot de una muselina cruzada que muestra la división en celdas, al igual que en la técnica del fotograbado por trama. 1853.

con una imagen positivo en papel o en cristal. A partir de ahí, se siguen los pasos del procedimiento anterior. Para la fabricación de la emulsión fotosensible, se recomendaba también la utilización de otras sustancias aglutinantes como la albúmina o la goma arábiga. Con este procedimiento se consiguió reproducir los medios tonos mucho mejor que con el primero, que tan sólo lograba imprimir de forma fiel y óptima las líneas más marcadas de la imagen. Además, este primer método presentaba el inconveniente añadido de que la aplicación de la tinta a la plancha y la limpieza de la tinta sobrante no permitían un control de la impresión respecto de las zonas más abiertas e indeterminadas del dibujo, algo que sí se consiguió con la utilización de la trama de puntos o celdas en las que quedaba depositada la tinta con una mayor precisión. La búsqueda de piezas de telas con mayor densidad de celdas en sus tramas se convirtió para este autor, casi en una obsesión. Un fabricante francés le sugirió la utilización de una tela especial que se utilizaba para cribar harina, que le podría proporcionar

alrededor de 42.000 orificios por pulgada cuadrada<sup>52</sup>. El camino hacia la pixelización de la imagen se había iniciado.

Tal como ha salido a relucir anteriormente, el fotograbado tramado nace directamente de la calotipia o talbotipia, considerada por muchos la primera técnica fotográfica de la historia si atendemos a lo que ha sido su desenlace posterior. Su aparición supuso un salto cualitativo muy importante, por establecer de un solo golpe el principio de la imagen latente y el procedimiento fotográfico que todos conocemos, que permite reproducir múltiples copias a partir de una sola imagen negativo. Esta técnica vino a hacer sombra al daguerrotipo, que hasta entonces gozaba de una gran popularidad y aceptación entre el público y la comunidad de científicos y artistas por su indiscutible calidad de imagen, a pesar del inconveniente de generar una copia única. El calotipo, por tanto, se presentó como una técnica en mayor consonancia con unos tiempos que exigían cada vez más niveles de automatismo en los procesos industriales, incluido la reproducción gráfica. La historia nos ha confirmado suficientemente este hecho cuando observamos que la talbotipia se encuentra en el origen de una metodología de reproducción fotográfica de un protagonismo indiscutible en el conjunto de la producción de imagen tecnológica de más de un siglo, liderazgo que sólo ha sido eclipsado recientemente con la llegada de las nuevas técnicas digitales. La calotipia de Talbot, además de establecer un método fotográfico fundamental, se convirtió en el instrumento práctico de incontables formas de estampación tanto mecánicas como electromecánicas. De hecho, fue esta técnica, unido al interés de Talbot por publicar sus propias fotografías en su libro *The Pencil of Nature* (1844- 45) lo que incitó a este autor a buscar nuevas formas de estampación más prácticas que las existentes hasta entonces , y que estuvieran basadas en la fotografía<sup>53</sup>. Tras unos años de intenso trabajo con diversos métodos fotomecánicos, decidió presentar en 1852 la técnica del *fotograbado*.



Fig. 2.36. Fotograbado por pantalla tramada, Talbot. 1852. Detalle.

La era de la impresión por tramas quedaba de esta forma inaugurada. Desde entonces, el procedimiento original ha sufrido continuas modificaciones, pero básicamente sigue el procedimiento establecido por Talbot. Esta técnica, conocida en su primera versión como *fotograbado por plancha de contacto*, y posteriormente como *grabado directo o tramado*, inauguró un periodo nuevo en los procesos de reproducción gráfica. Su rápida aceptación vino dada por la incorporación de los procesos fotográficos a una escala de mayor mecanización y automatismo, hecho que dio lugar a todo el conjunto de técnicas fotomecánicas de impresión. Con ellas, se consiguió un medio de reproducción a nivel industrial en el que, por primera vez, la participación de los artistas y dibujantes quedó relegada a un segundo término, o suprimida. La conjunción de fotografía y artes gráficas marcó el origen de múltiples procedimientos de impresión de gran aceptación en todos los medios de comunicación de masas en los que la imagen impresa empezó a desempeñar un papel de primer orden. A ello, hay que añadir tanto el heliograbado de Niepce, como los grabados producidos a partir de daguerrotipos, por citar dos ejemplos de técnicas anteriores de éxito, presentaban el inconveniente añadido de que el patrón que servía para imprimir las copias era demasiado frágil para soportar la acción mecánica de las prensas.



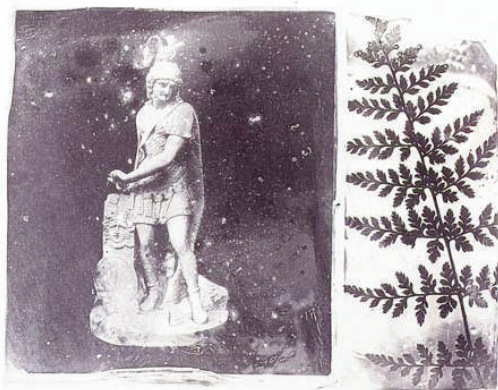


Fig. 2.37. Grabado fotoglífico experimental de estatua y helecho, c. 1853. Talbot.

Seis años más tarde Talbot presentó un nuevo procedimiento que utilizaba planchas de cobre y aguatina con el que logró reproducir las sombras y las luces altas con mayor precisión. Las soluciones químicas causantes de la grabación de la plancha podían ser, en este caso, aplicadas poco a poco y localmente, con lo que se evitaba el fuerte contraste de métodos anteriores. La aguatina, como vimos en el ejemplo de Goya, era un procedimiento muy común entre los grabadores artesanales de la época. Su aplicación en la técnica del fotograbado se llevó a cabo mediante la utilización de resinas naturales que eran espolvoreadas sobre las emulsiones. Los diminutos puntos que se forman en la emulsión por

la deposición de este tipo de resina servían de barrera a la acción de los ácidos grabadores de la plancha y ayudaban a formar a su vez los orificios donde se depositaban más tarde la tinta. A su vez, la plancha era rociada con aguatina en polvo antes de su sensibilización, facilitando posteriormente la reproducción de los tonos medios y bajos. A finales de este mismo año, de 1858 se publicaron los fotograbados de Talbot en *The Photographic News*, siguiendo este procedimiento. Al año siguiente, aparecieron en esta misma revista nuevos grabados de dicho autor, denominados “fotoglifos”, considerados como los precursores directos del fotograbado moderno. (Fig. 2.37)

Tomando como base los trabajos de Talbot, diversos autores como Bechtold, Wilson Swan, o Gillot, hicieron importantes mejoras de la técnica tramada, la mayoría de ellas encaminadas a conseguir una mayor mecanización de los procesos y a mejorar el rendimiento de las sustancias fotosensibles empleadas. Gillot, en asociación con Nègre, fue el primero en ensayar fórmulas industriales para la producción de imágenes de medios tonos mediante sustancias fotosensibles fabricadas con albúmina, gelatina bicromatada, o asfalto. Ya vimos los intentos de este impresor por conseguir láminas grabadas mediante la técnica del asfalto utilizando medios electrolíticos. En 1867, apareció el método Garnier-Dujardin, una variante de la técnica de Talbot de pantallas tramadas, que incorporó el uso de una cuchilla de acero, denominada *doctor*, para la limpieza de la tinta sobrante en las planchas, utensilio que acabó imponiéndose en multitud de técnicas posteriores. En Estados Unidos, Max Levy comenzó también a utilizar una pantalla de líneas cruzadas, que le permitió imprimir directamente desde negativos adheridos a planchas de zinc. Es importante reseñar que hasta los años setenta, los procesos de impresión de los textos y de las imágenes iban por separado, debido en parte a que las reproducciones de las fotografías no habían conseguido una calidad aceptable, hecho por el que los impresores seguían prefiriendo los dibujos. En estas fechas, la mayoría de los dibujos, basados ya en fotografías, se tenían que transferir manualmente a la plancha junto a los textos. Fue la técnica de los medios tonos la que posibilitó la incorporación de las fotografías junto a los textos en prácticamente todas las técnicas de impresión existentes. En 1880, Angerer introdujo *pizarras borrador* con líneas cruzadas milimetradas para hacer más fácil y de forma rutinaria estas operaciones, algo que permitió incorporar dibujos y apuntes, inspirados en fotografías, en las publicaciones periódicas. Por su parte, Georg Meisenbach, de Munich, fue uno de los primeros en aplicar a principios de los ochenta la técnica de los medios tonos a la edición de libros ilustrados. Su procedimiento consistió en colocar una pantalla transparente, normalmente de cristal, trazada con líneas paralelas, que se giraba noventa

grados una vez que se había expuesto el negativo la mitad del tiempo requerido, luego se exponía durante el resto, obteniéndose completa la trama cuadrículada de medios tonos. El mismo procedimiento se podía hacer mediante el uso de una diapositiva que se obtenía de una copia positivo. Se ponía en contacto con la pantalla transparente, y se procedía de la misma forma, variando el ángulo de la trama y exponiéndola en dos fases. La técnica fue depurada en 1886 por Frederic Eugene Ives con la utilización de pantallas cuadrículadas, emplazadas en las propias cámaras fotográficas, dando lugar a negativos de medios tonos directamente. Estos negativos servían para producir planchas de cobre huecograbadas, aptas para ser colocadas directamente junto a las planchas tipográficas.

Hacia finales de siglo ya existían varias técnicas de medios tonos en pleno funcionamiento en el ámbito industrial. En 1877 los hermanos Jaffé introdujeron la técnica en los periódicos utilizando pantallas de gasas y redes, con resultados no muy halagüeños. La técnica se aplicó también en la estampación de fotograbados, zincografía, fotolitografía y en colotipo de tres colores. En 1880, S. H. Horgan, un fotógrafo periodista, introdujo la técnica en los periódicos de Nueva York. Y Max Levy, también fotógrafo, siguiendo los pasos de Ives, consiguió depurar la técnica obteniendo resultados excelentes que le ayudaron a exportarla rápidamente a Europa.

Entre todos estos procedimientos destacó la técnica del *fotograbado* de Karl Klietsch, aparecida en 1879. Esta modalidad de fotograbado recibió en su época el nombre de *heliograbado*, pero en la actualidad se le conoce como *huecograbado* moderno o *rotograbado*. La técnica se basó en un proceso de pigmentación, y sufrió numerosas modificaciones y mejoras a lo largo de los años, hasta que en 1895 pudo ser aplicada en cilindros de impresión rotatorios para grandes tiradas, de donde recibió el nombre de *rotograbado*. La imagen que se quería reproducir era transferida por medio de la técnica de la aguatinta a una placa de cobre granulada. Esta se revelaba luego en agua templada, y se grababa con una solución ácida de cloruro de hierro de fuerza variable. Con este procedimiento se hicieron buena parte de las reproducciones de arte de la época con resultados muy nítidos y ricos en los detalles y en los medios tonos. El rotograbado hizo uso de la técnica de medios tonos por tramas aplicadas a los cilindros, y de la técnica de la cuchilla "*doctor*", desarrollada años antes por Garnier-Dujardin. En 1895, Klietsch estableció una empresa en Lancaster, Inglaterra, dedicada a la reproducción en masa de tarjetas, publicaciones periódicas como el *Illustrated London News*, reproducciones de obras de arte, etc., con un método que mantuvo en secreto durante años.

Tras los pasos de Klietsch, surgieron numerosas empresas dedicadas a un negocio de la impresión que comenzaba a presentar unas dimensiones desconocidas hasta entonces, en gran parte debido a la proliferación de revistas y periódicos, y en menor medida, pero sorprendentemente, a una industria dedicada a la fabricación de papel y telas estampadas. Entre 1900 y 1905, Mertens y Schöpff pusieron en práctica un nuevo método consistente en transferir papel pigmento a cilindros de impresión. Esto posibilitó la reproducción masiva de fotografías junto a textos para la industria de la prensa. Los resultados no se hicieron esperar, la técnica de estampación por medios tonos, combinada con la tipografía, posibilitó la aparición en 1904 del periódico *Der Tag*, primero en su género. En 1910 apareció el *Freiburger Zeitung*, primer periódico ilustrado de edición masiva, con capacidad de hacer tiradas a razón de diez mil impresiones por hora, gracias al uso de prensas de rotograbado sobre cilindros tramados que incorporaban plenamente las imágenes.

### ***2.3.5. La artes gráficas en los umbrales del siglo XX.***

A principios del siglo XX las técnicas de impresión para grandes tiradas se habían decantado hacia unos pocos procedimientos básicos, en los que la presencia de la fotografía y de las técnicas fotomecánicas era ineludible. Por su parte, la participación de los procesos eléctricos y electrónicos, y del conjunto de dispositivos e instrumentos derivados de éstos, especialmente de aquellos destinados a la captación, formación y transmisión de imágenes, fueron en aumento a medida que avanzaba el siglo. Ejemplos de esta paulatina integración de la ingeniería eléctrica en el conjunto de las artes gráficas fueron la incorporación de motores eléctricos para mover las pesadas máquinas rotatorias, la utilización de células fotoeléctricas o de sistemas de escaneado electrónicos para el control de calidad de las impresiones, la monitorización a través de técnicas de vídeo y televisión o, más posteriormente, las impresiones mediante tecnología láser por inyección de tinta controlada por microprocesadores, o los procesos fotolitográficos en la fabricación de circuitos integrados, etc. Todo lo anterior nos demuestra cómo las técnicas de impresión actuales, la mayoría de las cuales utilizan fórmulas híbridas, han sabido integrar las aportaciones recibidas de las distintas ramas de la ciencia y la tecnología a lo largo de estos dos últimos siglos. A las contribuciones de la fotografía y de la electrónica hay que añadir, sin duda, todas las herramientas que la tecnología de los ordenadores ha traído a este campo, tanto para las labores de fotocomposición, tratamiento de imágenes y textos, etc., como para las funciones de control de los procesos de impresión.

La presencia de la tecnología digital en nuestros días está revolucionando el panorama de las artes gráficas; por un lado, integrando los procesos de fotocomposición y de impresión en empresas que absorben ambas responsabilidades, y comienzan a ofrecer servicios integrados desde hace relativamente poco tiempo; y, por otro, abriendo nuevos canales de difusión y de autoedición a partir de la llegada de los ordenadores personales y de nuevas redes de comunicación como Internet. El ordenador personal conlleva asimismo el desarrollo de equipos periféricos, muchos de carácter doméstico o portátil, como son los escáneres, las impresoras, las cámaras, o las filmadoras, y de software para la edición, composición, retoques, etc., que hacen posible una nueva dimensión en la producción dentro de las artes gráficas. En este contexto, el universo de la imagen tecnológica presenta hoy día una variedad enorme de técnicas y productos que se solapan constantemente en sus aplicaciones. La llegada de la tecnología digital está afectando profundamente a la estructura industrial hasta ahora imperante y al uso público que se hace de estas tecnologías, tanto en las áreas de la fotografía convencional y de la imagen electrónica (televisión, ordenadores, móviles, fotografía y vídeo, etc.), como de la reprografía y de las artes gráficas. En este último campo, el panorama está cambiando progresivamente al ritmo que le marcan las nuevas formas de consumo de productos editoriales, que en líneas generales demandan tiradas menores, de ámbito más local y más especializadas, y que vienen marcadas por los nuevos canales electrónicos de distribución y compra-venta de productos. Los orígenes de los procedimientos de impresión más utilizados hasta hoy día se encuentran en la mayoría de los casos en las dos primeras décadas del siglo XX, siendo los más destacados el huecograbado, el offset, la serigrafía, la flexografía y la fotolitografía.<sup>54</sup>

El huecograbado es la tecnología que cuenta con más años de experiencia, especialmente en el ámbito de las grandes tiradas, siendo el procedimiento que la industria ha desarrollado con más insistencia desde finales del siglo XIX. Su adaptación a los procesos fotomecánicos y a los mayores niveles de automatismo exigidos por las nuevas máquinas rotativas, le otorgaron durante décadas un

liderazgo que sólo comenzó a remitir a partir de la llegada de la impresión *offset*. Hasta mediados del siglo XX, la combinación de las rotativas tipográficas con el huecograbado fue la fórmula más extendida dentro del ámbito de la publicación en grandes tiradas, de periódicos, libros y publicaciones de toda índole. Y la fórmula más utilizada para las impresiones siguió siendo la desarrollada por Klietsch por medio de la técnica del huecograbado tramado, en la que la reproducción de los medios tonos se consigue con la impregnación de cilindros de impresión con papel pigmento: un compuesto de gelatina fotosensible que se somete a la acción de un baño ácido para formar en el metal las celdillas en las que se deposita la tinta.

Los procesos electrónicos puestos en práctica a partir del perfeccionamiento de los sistemas de escaneado y de impresión de imágenes, gracias al desarrollo de las células fotoeléctricas, se adaptaron con facilidad a estas técnicas de impresión de cilindros rotatorios. El escaneado de las imágenes mediante fotocélulas y el empleo de haces de electrones para registrar las diferentes intensidades lumínicas, tal como son utilizados en la tecnología de la televisión, fue una técnica que fácilmente se pudo utilizar para fines de grabación. Las señales generadas a partir de estos haces de electrones se pudieron acoplar a un estilete que se encargaba de producir el huecograbado directamente en la plancha impresora, con mayor o menor profundidad de acuerdo a la luz recibida. Las ventajas de este tipo de técnicas, en relación con las anteriores, se pusieron de manifiesto tan pronto como se consiguió una mayor rapidez y control en todo el proceso, con la posibilidad de hacer ampliaciones o reducciones automáticas, de imprimir negativo o positivo sólo con cambiar el sentido de los impulsos recibidos, y de obtener un mayor control de los tonos. Este tipo de sistemas cobró un nuevo impulso a partir de la década de los sesenta, con la puesta en práctica de la tecnología de transistores y la incorporación de nuevos procedimientos electromecánicos, como cabezales grabadores con punta de diamante capaces de abrir por sí solos las celdillas en las planchas de metal en una disposición reticulada.

En la actualidad se ha vuelto a la utilización de fórmulas próximas al huecograbado tradicional, pero incorporando materiales polímeros fotosensibles y tecnología láser aplicada a superficies fotosensibles; o directamente utilizando el láser como elemento grabador sobre las planchas; y también al uso de técnicas electrostáticas por deposición de toners, próximas a las utilizadas en reprografía. En este contexto, hay que destacar los procedimientos de impresión tan extendidos hoy día por medio de impresoras o de plotters acoplados a ordenadores<sup>55</sup>. Aunque las principales tareas lógicas o de software, relativas a las impresiones informatizadas, quedan por lo general ubicadas en el ordenador, las impresoras están absorbiendo cada vez más responsabilidades en este sentido. Los tres procedimientos básicos son el matricial, el de inyección de tintas y el láser. Sus productos cubren un área de aplicación muy extensa, que va desde las impresiones de simples caracteres alfanuméricos, propias de la tecnología matricial más simple, a las de fotografías de alta resolución, correspondiente a la tecnología láser. La matricial imprime puntos monocromáticos por la acción de un cabezal de puntas diminutas sobre una cinta entintada. En la actualidad, esta tecnología es capaz de realizar impresiones de gráficos de alta resolución, a medida que ha ido incorporando nuevos automatismos y capacidades lógicas operativas y de memoria.<sup>56</sup> Las de inyección de tinta, como su nombre indica, funcionan por la aspersión de tinta caliente a través de un pequeño orificio, en gotas muy diminutas. El sistema mecánico de impresión es parecido al matricial, en el sentido de que el cabezal recorre el papel cuantas veces sea necesario para realizar la impresión de forma completa. El conjunto de este tipo de impresoras funciona por el procedimiento de medios tonos, que en el caso de impresiones de color lo lleva a cabo por cuatricromía CMYK (Cian, Magenta, Amarillo y Negro).



Por último, la impresión láser sigue el esquema de funcionamiento de la xerografía, con la salvedad de que la operación se controla directamente desde el ordenador, encargado de activar un LED (Light Emitting Diode), o diodo de emisión de luz, en vez del escaneado por luz, propio de los sistemas reprográficos. El láser es el artifice de iluminar un tambor rotatorio que queda cargado electrostáticamente, de acuerdo a la imagen disponible en el ordenador, o a partir del escaneado de la superficie de puntos de una imagen impresa. A partir de ahí, el proceso de impresión es similar al reprográfico, mediante la utilización de un toner y la fijación por medios térmicos. Este tipo de tecnología puede imprimir en medios tonos, o en tonos continuos mediante las más recientes técnicas de sublimación de tintes y de transferencia térmica de ceras, y con la utilización de papel fotográfico.

La tecnología *offset*, por su parte, es un procedimiento derivado de la técnica litográfica, por lo que se trata de una técnica planográfica. Aunque su invención data de mediados del siglo XIX, no fue hasta principios del siglo pasado que se comenzó a utilizar a nivel industrial y con un éxito arrollador. Se basa en la utilización de varios cilindros de impresión. La plancha de metal grabada se curva alrededor del primer cilindro y se embadurna en la tinta, luego un segundo cilindro contiguo de goma de caucho absorbe la imagen y la *transfiere* -de ahí su nombre en inglés, *offset*- al papel. Se trata de una tecnología que ha tenido una gran aceptación en la industria del siglo XX, representando un cuarenta por ciento del conjunto de las impresiones gráficas de hoy día. Utiliza máquinas rápidas que pueden imprimir en papel grueso y en color<sup>57</sup>; actualmente sus planchas se fabrican con diversos materiales como celulosa, plástico, y aleaciones de distintos metales, dando lugar a dos formas de impresión básicas, húmeda y en seco, dependiendo si la plancha se debe bañar en agua previamente al entintado, o no. El offset, al igual que muchos sistemas reprográficos, hace uso de la técnica del fotolito, consistente en una lámina de plástico coloide fotosensibilizada por medio de radiación ultravioleta, a la que se pueden adherir tanto las imágenes fotográficas como los textos. En la actualidad se hace directamente desde los ordenadores a la plancha de grabación.

La serigrafía, por su parte, es una técnica que se encuentra hoy día muy presente en multitud de aplicaciones, que van desde la industria textil a todo tipo de cartelería, impresiones en plásticos, cerámicas, vidrios, envases, embalajes, etc. El uso de tintas especiales ha posibilitado su presencia en prácticamente la mayoría de los productos comerciales que nos rodean hoy día en tiendas y supermercados, desde juguetes, camisetas, posters, menaje del hogar, etc. Aunque sus orígenes se encuentran en tiempos remotos, especialmente en oriente, donde ha sido siempre una técnica artesanal muy practicada, o en la Europa medieval, aplicada a la grabación xilográfica de motivos religiosos, no fue hasta principios del siglo XX que la industria comenzó a hacer uso de ella, especialmente para fines publicitarios. Se trata de un sistema que utiliza una pantalla de seda que es tratada previamente con máscaras de más o menos permeabilidad, de manera que al entintarse, la tinta es repelida o absorbida de acuerdo con el patrón del dibujo o de las imágenes y textos que se quiere imprimir. Con el tiempo, comenzó a utilizar diferentes técnicas fotográficas para la creación de máscaras mediante gelatinas fotosensibles, así como técnicas de tramado para la reproducción de los medios tonos y de cuatricromía para la impresión en color.

Por su parte, la flexografía es una tecnología de impresión que se inspira en elementos de las restantes, en especial del huecograbado con el que comparte el empleo de tintas muy líquidas y los procesos rotatorios. Como la tipografía tradicional, utiliza planchas en relieve, y como el offset, las planchas son de caucho. Este bagaje experimental ha contribuido a convertirla en uno de los



sistemas de impresión más utilizados hoy día, compartiendo su campo de aplicación mayormente con la serigrafía, sobre todo en la impresión de envases, embalajes, etiquetas, plastificados, etc. Sus orígenes se encuentran también en el siglo XIX, con la invención de la técnica de la vulcanización hacia 1839, procedimiento con el que se consigue endurecer el caucho y sus derivados. Pero no sería hasta principios del siglo XX, al igual que el resto de las técnicas comentadas, cuando la industria se decide por su utilización masiva, y más especialmente a raíz de la invención de las gomas sintéticas<sup>58</sup>. Su característica más definitoria le viene dada por realizar un tipo de impresión muy delicada, que respeta al máximo los materiales en los que se llevan a cabo las impresiones. La utilización de rodillos y tintas líquidas que sólo necesitan *besar* - de ahí, la denominación *kiss printing*, en inglés- la superficie de impresión la convierte en una técnica muy adecuada para su aplicación sobre materiales frágiles.

Por último, la presencia en nuestros días de los métodos fotolitográficos no se circunscribe a la tecnología *offset* o a los procedimientos más tradicionales, cultivados mayormente en el ámbito artístico; es importante reseñar que la fotolitografía representa una técnica fundamental en la fabricación de circuitos integrados, dispositivos de gran aplicación en los microprocesadores y en otros productos electrónicos de la importancia de los actuales sensores de imagen para vídeo y fotografía. Los procesos fotolitográficos obedecen a un proceso altamente complejo que se lleva a cabo a nivel microelectrónico. El material de partida son obleas de silicio a las que se van añadiendo sucesivos circuitos por procedimientos de formación de máscaras, oxidación, y deposición. La fotolitografía es utilizada para transferir las distintas mascarar sobre la oblea, delimitando con precisión las zonas donde van a ir emplazadas. El proceso consiste en colocar la máscara sobre una oblea que hemos revestido previamente con una resina fotosensible; y una vez que se expone a radiación ultravioleta, se procede a disolver las partes afectadas tal como se suele hacer en los procesos fotolitográficos convencionales. La resina revelada demarca con precisión las zonas de actuación sobre las que se grabará la oblea con los distintos materiales que conforman el circuito. Algunos de estos circuitos se obtienen también con la ayuda de procesos derivados de la serigrafía.

El conjunto de las artes gráficas ha desempeñado un papel de primer orden en la difusión del conocimiento científico, como vehículo de comunicación de montajes experimentales, nuevas observaciones y resultados. Como el resto de las publicaciones, las revistas de carácter científico han ido incorporando, con el paso del tiempo, cada vez más imágenes a sus páginas. De unos cuantos grabados que se incluían a mediados del siglo XIX en revistas como *Nature* o *Scientific American*, se ha pasado en la actualidad a números repletos de fotografías e imágenes creadas en color, gráficos, diagramas e ilustraciones de diversa índole, en páginas donde los anunciantes de dispositivos y métodos destinados a la creación de imágenes tecnológicas son cada vez más numerosos. Hasta principios del siglo XX el grabado, en sus diferentes modalidades, fue la técnica más utilizada en este tipo de publicaciones. A partir de la década de los ochenta del siglo XIX se comenzó a incorporar fotograbados impresos, tanto junto a los textos como de forma independiente en aras de conseguirse una mayor calidad de impresión.

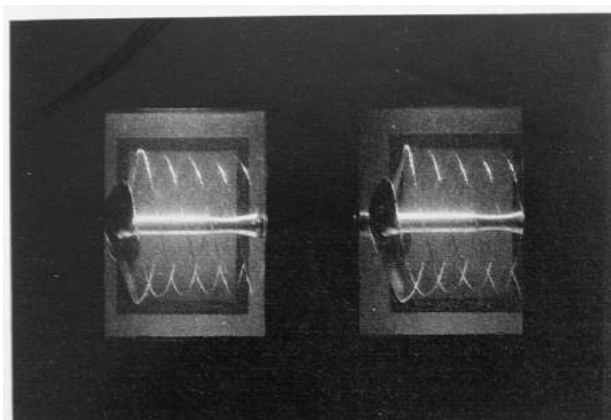
Hay que tener en cuenta que si la imagen ha cobrado con el tiempo una importancia inusitada en el quehacer científico, ha sido porque la fotografía impresa ha desempeñado un papel de primer orden. Y cuando decimos impresa nos referimos a la producida por las diferentes técnicas pertenecientes a las artes gráficas, que es la que comúnmente llega a manos del científico o del aficionado. Las copias originales son piezas fundamentales en experimentos y observaciones, pero que quedan recluidas en el seno de los laboratorios donde son producidas, siendo las imágenes impresas las que llegan a formar parte de la cadena de

comunicación entre científicos y de las plataformas para su difusión. Nunca se llegará a valorar lo suficiente la función que han desempeñado determinadas formas de fabricación de imágenes tecnológicas en la difusión del conocimiento, como han sido, especialmente, las producidas por los sistemas reprográficos o las procedentes de las artes gráficas. Este es un fenómeno que afecta no sólo a la imagen científica sino a todo el conjunto de las imágenes actuales, incluida la fotografía documental y la artística. Los originales son vistos en muy contadas ocasiones en museos o galerías, mientras que su presencia en los medios gráficos es constante. El límite de este razonamiento nos lleva a reparar en el hecho de que la realidad, tanto física como humana, es conocida cada vez más indirectamente a través de los medios de producción de información e imágenes artificiales.

## 2.4. De la electrografía a la electrofotografía

Existe un hecho diferencial en las imágenes que observamos cada día a nuestro alrededor, determinado por el número de dimensiones que presentan y por la forma en que son interpretadas por nuestro aparato psico-fisiológico. Son contados los medios tecnológicos que consiguen representar las tres dimensiones con las mismas propiedades con las que nuestros ojos desnudos ven la realidad y cada uno de sus objetos. Las técnicas estereográficas y la holografía son las más conocidas y practicadas hasta el momento. Normalmente, los sistemas más comunes de producción de imágenes reducen esta visión tridimensional, propia del aparato visual humano, a las dos dimensiones que proporciona un solo plano. En este caso, el abanico de posibilidades se expande considerablemente, pudiéndose encontrar modelos muy diversos, desde los que se rigen por la construcción de un espacio racionalizado geométricamente, y que quedan delimitados por los distintos tipos de perspectiva, hasta aquellos otros que reconstruyen el espacio de una forma más esquemática y arbitraria, en los que la disposición o el tamaño de los objetos obedece más a criterios de interpretación subjetiva, o a una tradición pictórica, que a una traslación al papel, rigurosa y analógica, de la distribución espacial que presenta la propia realidad, al menos, tal como aparece ante nuestros ojos. Entre los primeros, debemos destacar todos los modelos que se rigen por la perspectiva clásica, tal como fue formulada por Gian Battista Alberti en el siglo XV, o por la perspectiva paralela, de proyección ortogonal, o por la panorámica. Dentro de los segundos, debemos incluir aquellas fórmulas de representación iconográfica que pretenden simular o producir un efecto de tridimensionalidad con los recursos y las posibilidades que otorga un sólo plano, ya sea un lienzo, un papel fotográfico o una pared, y que no siguen la representación rectangular, en formato de ventana,

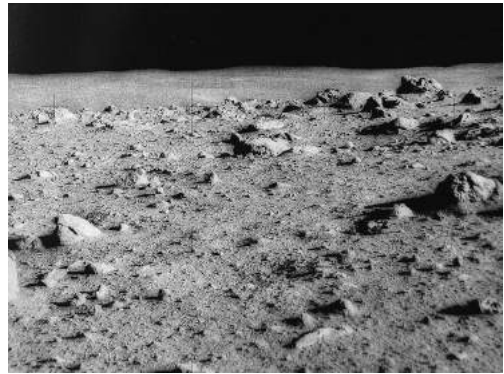
propia de las imágenes en perspectiva. Por último, encontramos las imágenes que representan una única dimensión y que se corresponden con trazos, líneas, manchas, colores, etc., que normalmente constituyen los elementos básicos con los que se forman las imágenes de mayor número de dimensiones.



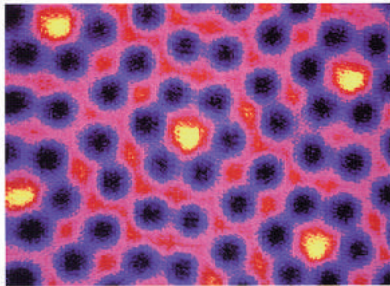
*Fig. 2.38. Fotografía estereoscópica de alta velocidad mostrando la cavidad interna de una hélice. Deryck Chesterman. c.a. 1960.*

En el terreno científico podemos entresacar algunos ejemplos representativos de todas estas formas de representación, que el lector podrá trasladar sin dificultad a los campos más divulgados de la

fotografía artística y documental o de la pintura, donde se dan estos mismos modelos. La fotografía estereoscópica de mediados del siglo XIX constituye un sistema tridimensional de representación de los objetos naturales que mantiene una gran vigencia hasta nuestros días, en ciencias tan de vanguardia como las dedicadas al análisis de los fenómenos de alta velocidad, o las relativas a los programas espaciales (Fig. 2.38). Las fotografías de las superficies de los planetas, enviadas por las sondas y naves espaciales o las tomadas directamente por los astronautas, se siguen haciendo en gran medida con esta técnica, que permite la visualización tridimensional y la medición de superficies y objetos. La estereofotografía desempeña también un papel de primer orden en fotomicrografía, fotogrametría, fotografía astronómica y en la actual imagen de síntesis, por mencionar otros ejemplos destacados.

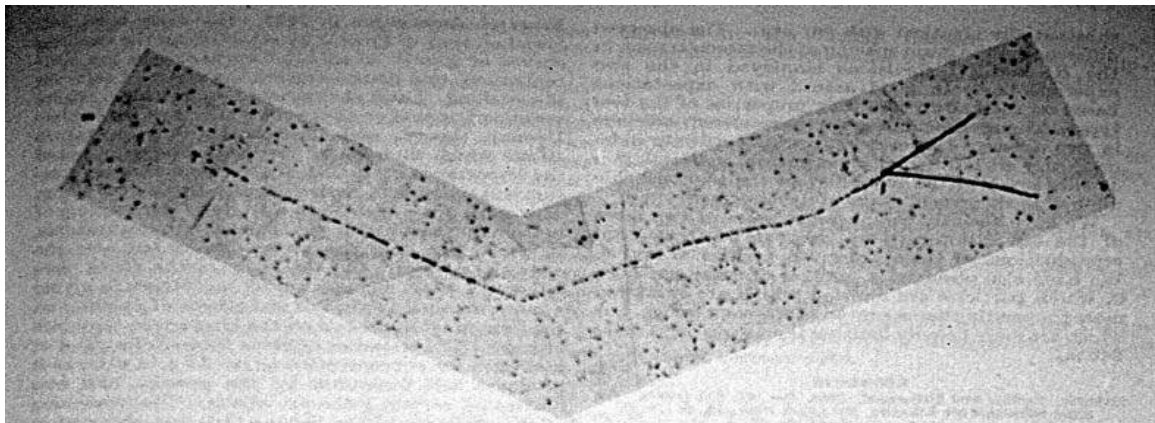


*Fig. 2.39. Al borde del cráter. Apolo 14, enero 1971.*



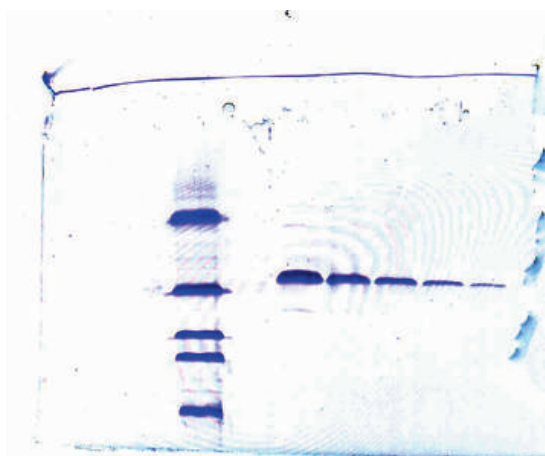
*Fig. 2.40. Microscopía de escáner túnel. (STM). Superficie de sílice, entramado atómico. Heinrich Rohrer, 1981. IBM.*

En el caso de la imagen científica construida según los cánones de la perspectiva clásica encontramos ejemplos incontables, tanto en forma de dibujos e ilustraciones como en formato fotográfico o de imagen electrónica. La mayoría de los aparatos productores de imagen tecnológica se rige por estos parámetros. Y esta abundancia es la misma que comprobamos en el ámbito de la imagen fotográfica de carácter artístico y documental. Toda vez que antepongamos un simple orificio, una ventana o un sistema óptico entre el objeto y el sensor, obtendremos imágenes dominadas por una u otra forma de perspectiva. La perspectiva panorámica, por ejemplo, ha sido ampliamente utilizada en la fotografía espacial de la superficie de los planetas, en fotografía aérea y en técnicas de fotogrametría (Fig. 2.39). En cambio, como ejemplos de imágenes científicas construidas en dos dimensiones, pero que adolecen de cualquier construcción en perspectiva, encontramos aquellos dibujos e ilustraciones de carácter científico que no siguen las leyes impuestas por este tipo de dictamen geométrico, normalmente por tratarse de obras anteriores a su



*Fig. 2.41. Desintegración nuclear. Meson. Emulsión C2 cargada con boron. Powell & Occhialini. Mosaico microfotográfico. 1947.*



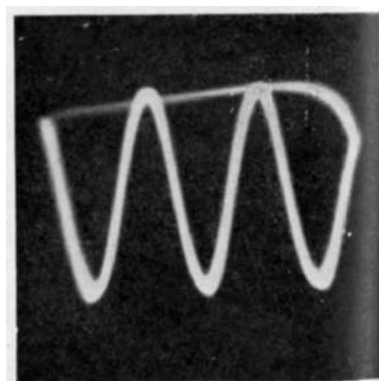


*Fig. 2.42. Electroforesis de proteínas, de una dimensión. Con tinte comassie. Lab. Protómica. CBM Severo Ochoa. AM. CSIC. 2005.*

formulación o por razones expositivas; o todo aquel conjunto de imágenes realizadas por contacto directo de los objetos con la superficie fotosensible, o por la acción directa de una radiación determinada sobre un sensor o emulsión, como puede ser el caso de la autorradiografía y de algunos tipos de microscopía y espectrografía (Fig. 2.40). También en el ámbito de la imagen científica encontramos representaciones que escapan a un formato rectangular y que se acercan a fórmulas artísticas como el fotomontaje o el collage, concretamente en los mosaicos fotográficos que recogen los trazos de las partículas atómicas (Fig. 2.41). La unidimensionalidad, por último, es una forma de representación que se encuentra muy presente en la ciencia en

múltiples facetas: desde imágenes no necesariamente fotográficas, como son las realizadas por deposición de materiales (electroforesis, cromatografía, etc.,) (Fig. 2.42), aquellas otras que recogen los trazos luminosos producidos por dispositivos electrónicos, tales como el osciloscopio<sup>59</sup> (Fig. 2.43), o las simples líneas, puntos o fragmentos que produce todo sistema de escaneado lineal, que no están destinados necesariamente a la formación de una imagen de dos dimensiones, tal como observamos en los actuales sistemas de fotodetección o de reconocimiento de imágenes.

Estas palabras introductorias, que simplifican de forma extrema el amplio espectro de posibilidades que existe en el campo de la representación espacial iconográfica, se presentan con la intención de delimitar las diferentes imágenes técnicas que han aparecido a lo largo de la historia, y más en concreto, para diferenciar los campos de acción de la electrografía y la electrofotografía. Pues se trata de dos términos que han sido utilizados indistintamente las más de las veces, probablemente por haber sido concebidos bajo un mismo paraguas conceptual, lo que ha redundado en una confusión generalizada agravada por el paso del tiempo. Tanto sus procedimientos como sus resultados obedecen a principios y valores distintos en lo que a tecnología e interpretación iconográfica se refiere, siendo esta la razón por la que prefiero analizarlos separadamente.



*Fig. 2.43. Fotografía de una imagen de un osciloscopio. Haas, A, y Hallows, R. W. 1954*

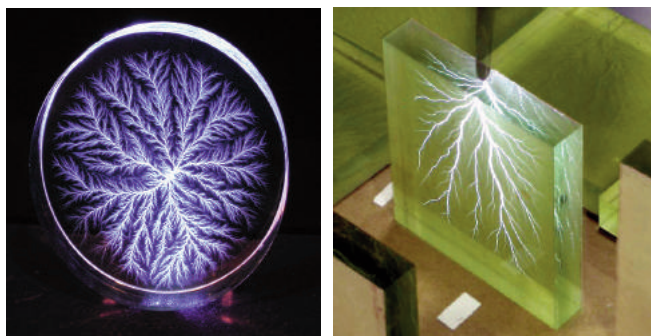
### **2.4.1. El universo electrográfico**

La diferencia básica que separa la electografía de la electrofotografía y que nos recomienda estudios independientes es aquella que viene determinada por el tipo de imagen que producen. Mientras que la electografía es muy versátil y permite generar imágenes que cubren todo el espectro de representaciones anteriormente enumerado, la electrofotografía tiende sobre todo a presentar los objetos en dos dimensiones, bajo una apariencia convencional, según haga uso de una u otra forma de perspectiva. Así, la electografía produce imágenes de una sola

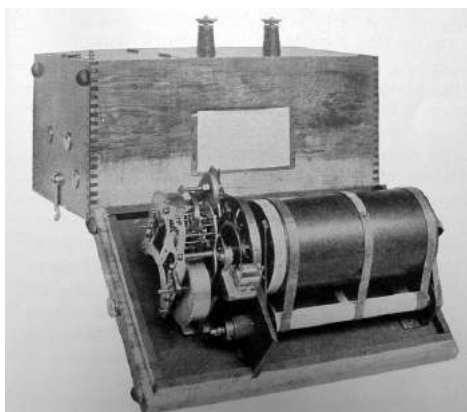


dimensión con el simple trazo de una línea o de un destello, imágenes gráficas de dos dimensiones en las que la dimensión del tiempo también puede estar presente, e incluso imágenes tridimensionales que recogen y muestran en bruto la acción de los fenómenos eléctricos. Por lo general, podemos entender por sistemas electrográficos todos aquellos en los que la acción de la energía electromagnética queda recogida directamente sobre una superficie sensible, sin la intervención de aparato óptico alguno o artilugio que reproduzca la sensación de bidimensionalidad propia de las imágenes convencionales en perspectiva. Para ello, debemos partir de la idea general de que la acción eléctrica, y por extensión toda la gama del espectro electromagnético, puede provenir de un fenómeno natural, tal como una descarga de una tormenta, o de cualquier dispositivo eléctrico de fabricación humana. Y que las superficies susceptibles de recoger el trazo o las figuras que esta energía procura pueden ser también muy diversas, desde objetos de la naturaleza, tales como rocas, cavidades, arena, etc., al papel milimetrado en el que queda registrado el trazo de un estilete activado por un impulso eléctrico. Por el contrario, la electrofotografía representa mayormente, y desde principios del siglo XX, a todas aquellas técnicas de reproducción de documentos e imágenes que conocemos en la actualidad por el nombre de reprografía y que se deben primordialmente a procedimientos electrostáticos. En ellas, como veremos, habrá que incluir una serie de técnicas afines, como son el electrofax, la producción de microfilms o el escáner, que se rigen por procedimientos muy cercanos.

La electrografía, por tanto, presenta unos orígenes inmemoriales, si partimos del hecho de que la acción de la energía eléctrica, tal como es producida por los relámpagos, está presente desde siempre en nuestro entorno natural, en la forma de accidentes geográficos y de patrones o figuras que aparecen en determinadas superficies del terreno, como es el caso de las fulguritas, esas marcas arborescentes que los rayos producen en las cavidades de la tierra silícea al modo de tubos vitrificados. Estas imágenes naturales son de la misma naturaleza que aquellas otras que Georg Christoph Lichtenberg (1742-1799) pudo conseguir en 1777 sobre una superficie de polvo de azufre, en este caso, mediante descargas eléctricas producidas en un laboratorio científico. Y son las mismas figuras que se producen en la actualidad, de forma tridimensional en cubos rectangulares cristalizados, por medio de aceleradores de haces de electrones tales como el Linac<sup>60</sup> (Figs. 2.44 y 2.45). Las figuras de Lichtenberg, asociadas a la fotografía, trascendieron el campo puramente experimental para convertirse con el tiempo en una herramienta de gran valía en electrotecnia, y más concretamente para la detección de fluctuaciones repentinas en las redes eléctricas. En Estados Unidos, la General Electric Company ensayó con éxito en 1927 un sistema de detección de este tipo de descargas producidas por los rayos, que afectaban a las redes de transporte eléctrico. Para ello, puso en práctica un dispositivo que registraba fotográfica y automáticamente este tipo de fenómenos, dando lugar a la producción de una serie de imágenes muy próximas a las conseguidas por Lichtenberg<sup>61</sup>. El dispositivo grabador, que denominaron en un origen *klidonógrafo* (Figura 2.46), recogía los impulsos eléctricos generados por las tormentas sobre una película fotográfica del tipo de alta sensibilidad de Kodak. La película se acoplaba alrededor de un tambor giratorio que avanzaba a una velocidad determinada con el fin de poder captar los eventos durante un período largo de tiempo, en este caso, de ocho días. De esta manera, se



Figs. 2.44 y 2.45. Cristalizaciones de figuras de Lichtenberg con aceleradores de electrones. 2005.



*Fig. 2.46. Aparato para registrar fotográficamente las descargas producidas en la red eléctrica por la acción de las tormentas. Lee y Foust. 1927*

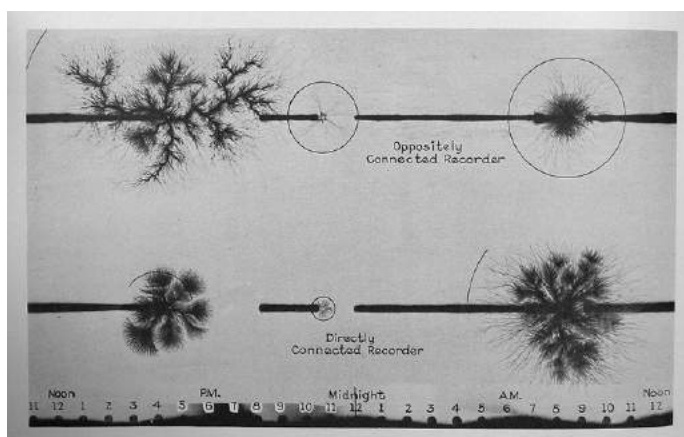
patrones que puedan arrojar algún tipo de luz o conocimiento acerca de estos fenómenos. Este tipo de investigaciones queda enmarcado en una tendencia generalizada, que se da tanto en el arte como en la ciencia de nuestros días, volcada en contemplar realidades cada vez más complejas tanto en lo que se refiere a su estructura como a su apariencia externa. La observación de fenómenos naturales mediante técnicas de reconocimiento y programas lógico-informáticos está posibilitando el estudio de imágenes de gran complejidad, tarea inabordable hasta hace muy poco tiempo. Las primeras fotografías de descargas eléctricas producidas en los laboratorios, como las realizadas en 1839 por Edmond Becquerel y por otros muchos científicos, y que pueden ser consideradas como las primeras muestras de electrografía de la historia, presentaron una complejidad enorme para los métodos de análisis de la época<sup>62</sup>. Algo similar ocurrió con las fotografías de los enfermos mentales, realizadas por Duchenne de Boulogne y Adrien Tournachon, a mediados de ese mismo siglo (Fig. 2.48), en un afán por descubrir rasgos comunes e identificativos de los pacientes, con resultados un tanto estériles en términos científicos, una vez que las comparamos con las técnicas actuales de reconocimiento empleadas por los sistemas de identificación por imagen, emplazados en fronteras y comisarías, y que comienzan a producir resultados muy prácticos, a la vez que preocupantes.

El concepto de electrografía tuvo varias acepciones en los años posteriores al descubrimiento de la fotografía.

Un primer significado fue el que adquirió en el contexto de las discusiones producidas en torno a las causas del fenómeno fotográfico. El debate se produjo entre los defensores de las interpretaciones más próximas a la fotoquímica y los que reivindicaban un mayor protagonismo para los fenómenos electroquímicos. Una curiosa experimentación, que sirvió de apoyo a esta última tesis y que se relacionó posteriormente con la electrografía, fue la llevada a cabo por el físico

consiguió registrar visualmente las descargas generadas por las tormentas. (Fig. 2.47). El esquema operativo era bien simple: tan sólo bastaba con disponer dos electrodos, uno de ellos unido a la línea eléctrica y el otro a una superficie aislante en contacto con una placa fotográfica. Las imágenes resultantes facilitaban información sobre el signo, positivo o negativo, de la descarga recibida, su voltaje, duración y hora exacta en que se había producido, así como su intensidad, dentro de unos límites fijados de antemano.

La simulación de este tipo de figuras mediante las actuales técnicas informáticas ha despertado el interés de aquellos científicos especializados en el estudio de la geometría fractal, en un intento de analizar y detectar



*Fig. 2.47. Registro fotográfico de descargas eléctricas en las redes eléctricas provocadas por rayos de tormentas. Lee y Foust. 1927*

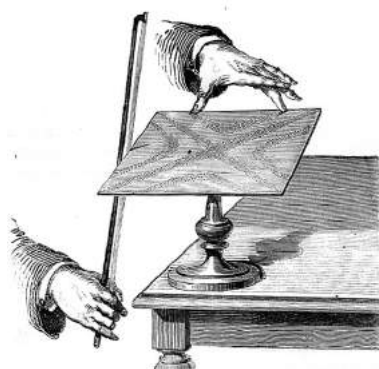
Ludwig F. Moser en 1842, al demostrar que al levantar una moneda que había dejado reposar durante unas horas sobre un cristal limpio, su figura aparecía difuminada con tan solo insuflar aliento sobre el cristal. Este experimento lo aplicó luego a daguerrotipos y le dio el nombre de *Hauchbild*, o imágenes aliento, atribuyéndolo a la acción del vapor sobre la emulsión. Esta interpretación del fenómeno recibió el apoyo de los científicos, que por entonces ya habían descubierto las propiedades reveladoras del vapor de mercurio en las placas fotográficas, y sirvió para que las investigaciones comenzaran a tener más en cuenta los componentes electroquímicos en los procesos fotográficos. Un claro exponente de este interés suscitado fue la obra de August Testelin, *Essai de théorie sur la formation des images photographiques, rapportée a une cause électrique*, de 1860, en la que se afirmaba que las moléculas del yoduro de plata sufrían una polarización eléctrica en la exposición, que hacía posible la precipitación del vapor de mercurio en aquellas partes afectadas por la luz.<sup>63</sup>



Fig. 2.48. Estudios sobre la fisionomía humana. Miedo, 1854. Dr. Duchenne y Adrien Tournachon.

Esta primera alusión al término de electrografía se vio pronto acompañada por otras provenientes de campos como el de las artes gráficas o el de la producción electromecánica de gráficos, lo que redundó en complicar la delimitación semántica del término. Ya vimos en el capítulo anterior, dedicado a las artes gráficas, que numerosos sistemas de electrotipia y de fotogalvanografía, como los de Kobell, Jacobi y Pretsch, recibieron el nombre de procedimientos electrográficos. A ello se unió que en estos mismos años de mediados de siglo, la electrografía comenzó también a abarcar semánticamente otro tipo de procedimientos de producción de imágenes que tendría una gran repercusión en la ciencia del futuro, una vez que pasó a representar a todos aquellos artilugios electromecánicos que registraban sobre papel común, o en muchas ocasiones sobre papel y película fotográficos, las señales eléctricas provenientes de múltiples fenómenos. En este caso, nos encontramos frente a un nuevo tipo de imagen que con el tiempo se ha convertido en una de las herramientas más utilizadas en los laboratorios científicos y que, en cierta medida, se puede considerar como una prolongación de los diagramas cartesianos, en los que los fenómenos naturales quedan representados esquemáticamente por figuras y movimientos o, en otros términos, por variables mensurables contempladas en sus relaciones de interdependencia, siendo la variable tiempo una de las más recurridas. Dada la gran diversidad de aplicaciones que esta metodología ha tenido en la ciencia a lo largo de los años, se atenderá en estas páginas mayormente a sus rasgos conceptuales más definitorios y a aquellas aplicaciones que están íntimamente relacionadas con las diferentes formas de imagen tecnológica, y en especial con la fotografía. La imagen en su conjunto configura una fuente de información para la ciencia que se entrelaza con los datos, siendo la frontera entre ambos altamente imprecisa. El valor cualitativo que nos ofrecen las imágenes puede ser transformado con facilidad en datos que pueden ser cuantificados; y el camino inverso es igualmente factible, especialmente desde la llegada de los ordenadores. La compenetración de ambas fuentes de información ha supuesto un camino de encuentros y desencuentros a lo largo de la historia, y las diferentes formas que la electrografía ha adoptado, han intervenido decisivamente en este proceso.



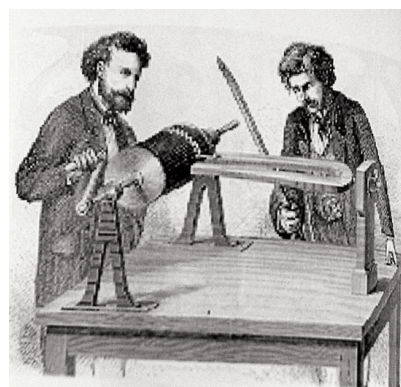


*Fig. 2.49. Placa para producir figuras de Chladni. Finales del XIX.*

La producción de imágenes gráficas por medios electromecánicos es un campo sujeto a múltiples fórmulas toda vez que incluimos bajo este concepto dispositivos que generan representaciones alfanuméricas, como es el caso del telégrafo, o artilugios y experiencias que transforman otros tipos de radiaciones o de vibraciones, en imágenes reconocibles. Ya vimos cómo las diferentes modalidades del telégrafo eléctrico buscaron con el tiempo alguna forma de imprimir los mensajes sobre papel, hecho que puede ser considerado una forma de electrografía. Tanto el sistema Morse como el Baudot o el Hughes intentaron superar con estos procedimientos gráficos las primeras formas más rudimentarias de telégrafo, como fue el caso del telégrafo de Gauss, el de Sommering, el Breguet, o el

Wheatstone, que se apoyaban en formas de visualización puramente mecánicas o electroquímicas, normalmente por medio de burbujas, agujas rotatorias o de ruedas que indicaban los distintos elementos del mensaje, y que el operador debía ir anotando manualmente. Los nuevos dispositivos de impresión, que comenzaron a registrar los impulsos sobre cintas de papel, permitieron algo tan importante como fue el registro documental de las comunicaciones.<sup>64</sup>

También el magnetismo, por sí solo, fue capaz de producir imágenes tan trascendentales para la ciencia como las conseguidas por Faraday haciendo uso de un imán y de limaduras de hierro esparcidas sobre un papel. La disposición geométrica que adoptaban las limaduras sobre las superficies reflejaban la distribución en ondas de los campos magnéticos producidos por el imán, a semejanza de las ondas que se forman en el agua por la acción de un objeto lanzado o por algún tipo de vibración producida sobre ella. Experiencias similares se constataron con las figuras de Chladni y las de Lissajous, que son originadas por las vibraciones mecánicas generadas por utensilios musicales o acústicos, tales como los arcos de los instrumentos de cuerda o los diapasones (Fig. 2.49). Aunque estas representaciones no son debidas estrictamente a una radiación del espectro electromagnético, sino a oscilaciones propagadas a través de medios materiales propias del sonido, hecho que las apartan de ser consideradas como una forma de electrografía en un sentido estricto, he preferido incluirlas en este apartado, y no en el correspondiente al sonido, por razones de ordenamiento cronológico y expositivas. El nombre de figuras de Chladni se debe al físico alemán, Ernst Chladni, quien consiguió en torno a 1800, producir estas *figuras acústicas* sobre superficies espolvoreadas de arena o polvo, tras un intenso estudio de los fenómenos vibratorios de los sólidos. Estas investigaciones abrieron un campo muy fructífero en los estudios de las ondas sonoras por medio de técnicas que permitieron la observación o representación de este tipo de fenómenos, algo que llega hasta nuestros días y que presenciamos en los monitores y consolas de cualquier estudio de grabación (Fig. 2.50). Próximas a este tipo de representaciones se encuentran las conocidas *experiencias o curvas de Lissajous*, que son gráficos acústicos realizados por primera vez hacia 1855 por el físico francés Jules Lissajous. Estas figuras son el resultado de hacer visible las ondas sonoras con el uso de instrumentos sonoros y de medios ópticos, fundamentalmente espejos giratorios y espejos colocados en los extremos de

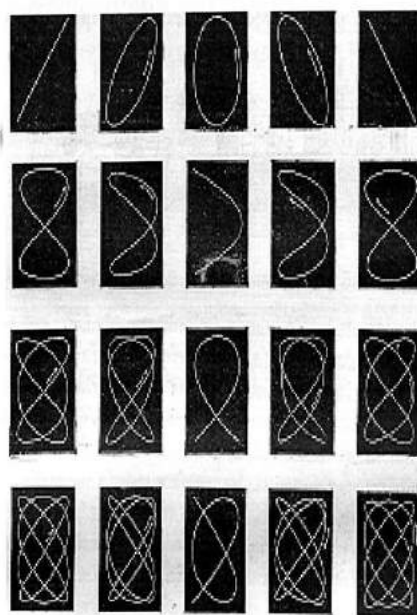


*Fig. 2.50. Diapasón cronográfico. c.a 1880.*



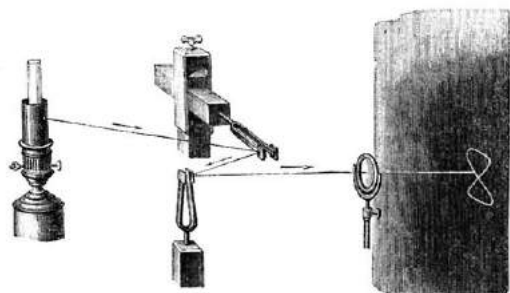
diapasones. Si en un principio tuvieron que hacerse en vivo, por lo que la observación de sus distintas formas se conseguía mediante el efecto de persistencia de nuestra retina, con el tiempo se pudieron fijar por medio de impresiones en papel pigmentado o emulsiones fotográficas. En este sentido se asemejan a las figuras que formarían posteriormente los osciloscopios (Fig. 2.51, 2.52 y 2.53) y que quedaron recogidas asimismo por fotografías.

La representación gráfica del sonido por medio de la fotografía produjo también otras experiencias muy interesantes como el estudio del lenguaje humano. En un principio, y a semejanza de las investigaciones ya comentadas, de sujetos con trastornos psicopatológicos o de delincuentes y criminales, también se realizaron estudios sobre la dicción y la fonética retratando a los sujetos a la hora de emitir las palabras y analizando posteriormente las formas labiales y gestuales que acompañaban a los sonidos (Fig. 2.54). Sin embargo, estos ensayos se mostraron más fructíferos cuando se comenzaron a registrar, también por medios fotográficos, las propias señales sonoras articuladas por los hablantes, fundamentalmente por medio de la utilización de espejos giratorios (Figs. 2.55 y 2.56).

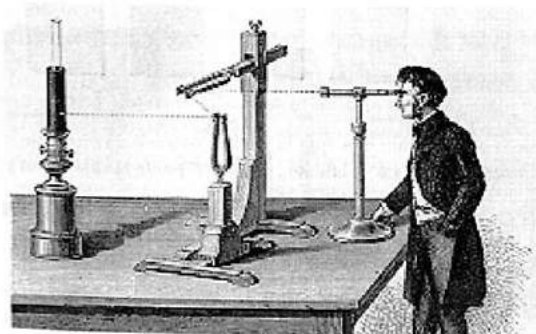


*Fig. 2.51. Figuras de Lissajous, 1855.*

Procedimientos muy parecidos tuvieron gran aplicación en campos tan dispares como el cinematográfico y el de las telecomunicaciones. La llegada del cine sonoro se debe en gran medida a la técnica que hizo posible la grabación de las señales



*Fig. 2.52. Experiencia de Lissajous. Para el estudio comparativo de las frecuencias de dos diapasones mediante un método óptico.*



*Fig. 2.53. Formación de figuras de Lissajous. Para el estudio de comparación de las frecuencias de dos diapasones mediante un método óptico.*

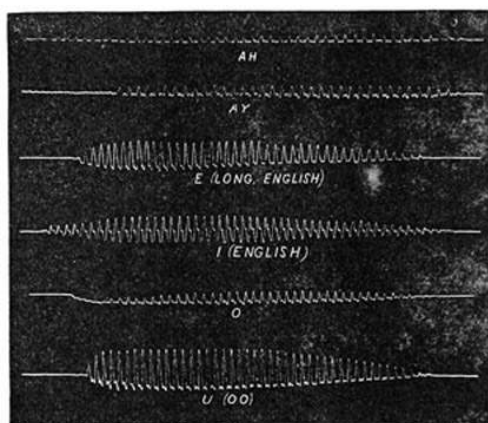
acústicas provenientes de los actores y del ambiente sobre la misma película cinematográfica. En este sentido, la incorporación de las primeras células fotoeléctricas en las primeras décadas del siglo XX, capaces de detectar señales luminosas muy débiles, como eran en este caso las originadas indirectamente por las ondas sonoras, fueron un elemento determinante a la hora de poder desarrollar una tecnología de grabación y reproducción del sonido que satisficiera las exigencias de la industria del momento.



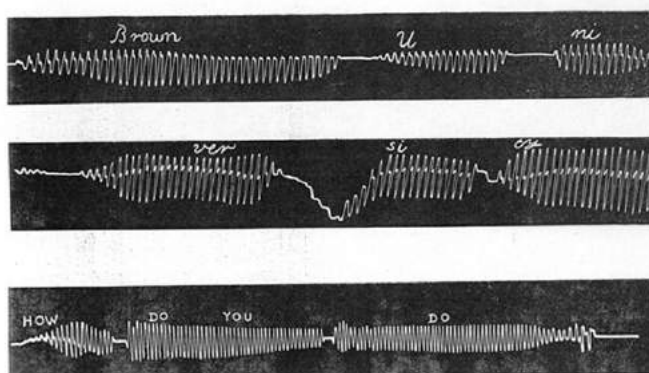
*Fig. 2.54. Cambios de expresión durante el habla.. Diez imágenes por segundo.*

La fotografía de las sales de plata fue un elemento crucial en esta tecnología, ofreciendo dos posibilidades a la hora de representar gráficamente los distintos niveles y cualidades del sonido. Una, mediante los distintos grados de densidad fotográfica (más o menos oscura) que quedaba recogida en la banda destinada al sonido, situada en un margen a lo largo de los fotogramas. Y otra, mediante el área ocupada por la impresión fotográfica (Fig. 2.57). Un procedimiento parecido fue utilizado durante la primera guerra mundial, para cubrir las necesidades de ciertos sistemas de telecomunicaciones. En este caso, se utilizó película cinematográfica para recoger los tiempos de recepción de señales radiofónicas pertenecientes a una serie de estaciones que quedaban de esta manera perfectamente identificadas (Fig. 2.58)

Los sistemas electrográficos tuvieron también una gran aplicación en los estudios fisiológicos. A mediados del siglo XIX se inició una intensa actividad en la fabricación de toda suerte de dispositivos que fueran capaces de registrar los



*Fig. 2.55 Grabación de vibraciones articuladas por medio de la fotografía. Vocales. E. W. Blake.1878.*



*Fig. 2.56 Grabación de vibraciones articuladas por medio de la fotografía. Palabras. E. W. Blake.1878.*

impulsos mecánicos o eléctricos procedentes de los seres vivos. Este empeño dio lugar a una tradición que perdura hasta nuestros días en el ámbito de la medicina o de la biología. Los primeros ensayos estaban dirigidos al estudio de constantes fisiológicas como el pulso, la temperatura o la presión sanguínea, y al registro de los movimientos rítmicos de determinados movimientos musculares y de las articulaciones. Si, en un principio, el trazo de las señales fue producido

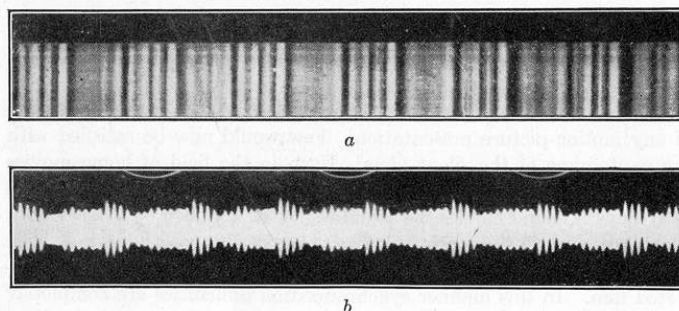


Fig. 2.57. Dos muestras de grabación de sonido en película fotográfica. Una por variación de densidad fotográfica y la segunda por variación del área.

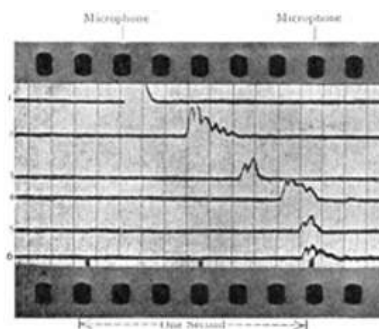


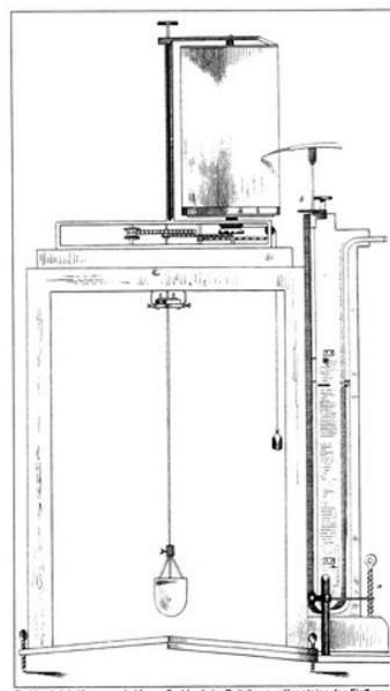
Fig. 2.58. Tiempos de recepción de un sonido procedente de seis estaciones distintas. Procedente de seis micrófonos.

mayormente por dispositivos como el *Quimógrafo*, nombre genérico que se dio a los aparatos que utilizaban un estilete entintado para reproducir los impulsos sobre una cinta de papel, pronto la fotografía entró en escena para facilitar y completar estas tareas. Esto se consiguió con la ayuda prestada por los distintos artilugios que la cronofotografía venía ensayando con éxito desde hacía años (Figs. 2.59 y 2.60).

Dentro de este escenario, es importante destacar la figura de Eadweard Muybridge y de Etienne Jules Marey, afamados científicos en el ámbito de la historia de la fotografía, que llevaron a cabo multitud de investigaciones en el terreno de la fisiología animal y humana. Marey, en particular diseñó en colaboración con Cheveau varios dispositivos electrográficos destinados a estos fines antes de utilizar la fotografía, que bautizó con el nombre genérico de *cronoestilografía*. Fueron famosos su *miógrafo*, para el registro de la tensión muscular, el *odógrafo* o *dinamógrafo*<sup>65</sup>, apto para registrar el movimiento de objetos a lo largo de un recorrido, ya fuera el de un caballo al que ataba a sus patas una serie de cintas capaces de transmitir el impulso generado por sus pisadas a una especie de contador (Fig. 2.61), o el de cualquier tipo de vehículo que se desplazara por un trayecto determinado; o el *esfigmógrafo* para recoger el ritmo cardíaco sobre un papel recorrido por un estilete (Fig. 2.62).

La electrografía ha trascendido con creces el mero ámbito de la *quimografía*, representada fundamentalmente por los distintos artilugios que representan gráficamente las distintas funciones de los seres vivos. Desde las anteriormente enumeradas a las más conocidas hoy día, como el electrocardiograma (Willem Einthoven, 1895), el electroencefalograma (H. Berger, 1922), o el registro de otras respuestas orgánicas como las de la propia retina (Fig. 2.63), la electrografía se expande hacia el registro de multitud de fenómenos naturales, como movimientos sísmicos, fondos marinos, o espacios intergalácticos. No sería aventurado afirmar que no existe disciplina científica que de una forma u otra no haya utilizado o utilice esta técnica de representación gráfica electromecánica. Sin ir más lejos, la propia

Fig. 2.59 *Kimógrafo de Carl Ludwig (1846), para los estudios fisiológicos. Con la ayuda de un manómetro el aparato registra la presión sanguínea.*





fotografía vio encomiable su uso en los primeros estudios para la determinación de la velocidad de los obturadores. Hacia 1870, cuando el término *instantánea* iba cobrando un puesto de importancia en el método fotográfico, la determinación de la velocidad de los obturadores comenzó a convertirse en una fuente inagotable de experimentaciones. Entre los primeros dispositivos que se montaron con estos fines, encontramos el *cromógrafo* (Fig. 2.64), registrador en papel de las vibraciones que un diapason activado eléctricamente, emitía en correspondencia con el tiempo de apertura de un obturador de guillotina.

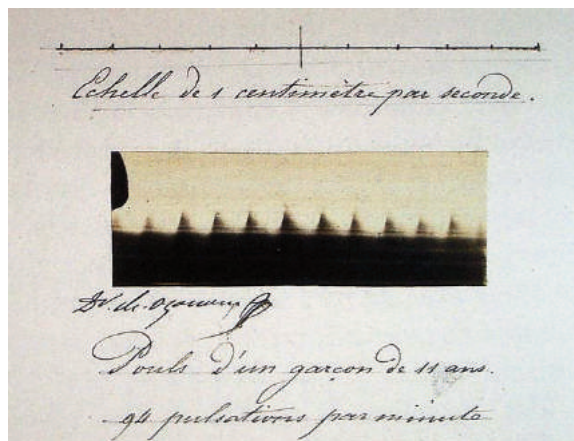


Fig. 2.60 Registro fotográfico del pulso de un muchacho de 11 años. Baldus y Ozanam. 1869.

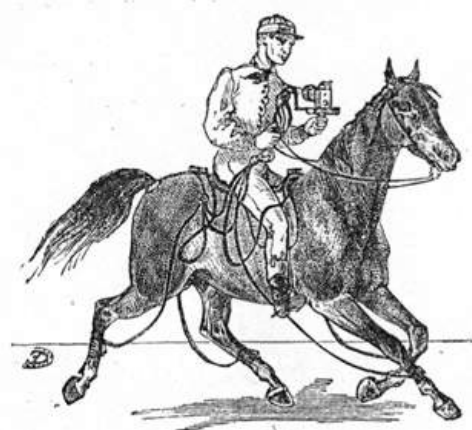


Fig. 2.61 Instrumento para medir el movimiento de las patas de un caballo. E. J. Marey. 1874.

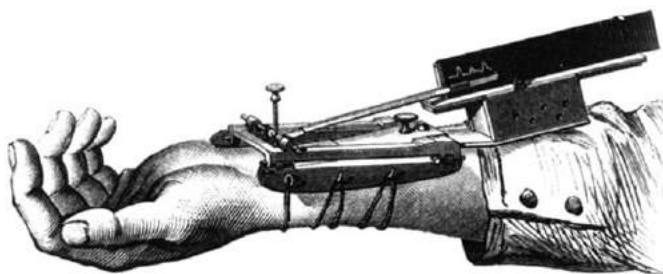


Fig. 2.62. Registrador de la presión sanguínea. 1859. E. J. Marey.

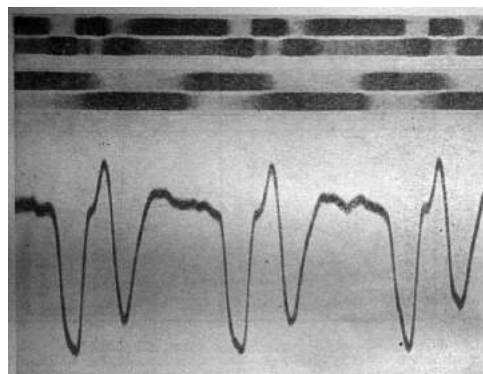
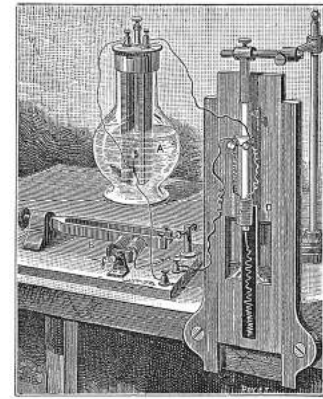


Fig. 2.63 Fotografías de la respuesta de la retina a estímulos luminosos. 1961.

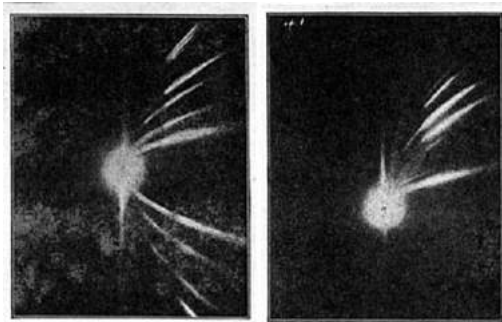
Sin embargo, a finales del siglo XIX la producción de imágenes fotográficas mediante la acción de distintas formas de energía eléctrica comenzó a entrar en un nuevo apartado repleto de descubrimientos decisivos para la ciencia. La irrupción de la electrónica dio lugar a una serie de ciencias y tecnologías dedicadas a la electricidad de *fuerza débil*, tal como se la denominó por entonces para distinguirlas de las más afines a la electrotecnia y dependientes de la producción en masa de esta fuente energética. El mundo electrónico fue el artífice del desarrollo de la radioemisión y el responsable de atraer la mirada de los científicos hacia el mundo oculto y diminuto de la estructura interna de la materia. Los múltiples ensayos realizados con los *tubos de descarga*, como el fabricado por Coolidge para la producción de rayos X, o con los nuevos dispositivos de visualización de fenómenos atómicos, como la cámara de niebla, posibilitaron el conocimiento de una serie de fenómenos de la importancia del propio electrón o de los rayos positivos, descubiertos por J. J. Thomson en 1897 y 1913 respectivamente (Fig. 2.65). Además, estos mismos tubos sirvieron para mostrarnos una serie de efectos luminosos producidos en su interior, decisivos en



el futuro para el conocimiento en profundidad de los rayos catódicos, aplicados a la producción de imagen electrónica (Fig. 2.66) y de la cámara de niebla de C. T. R. Wilson (Fig. 2.67), antecedente directo de las restantes cámaras de visualización de partículas y de los distintos aceleradores de partículas, desarrollados a lo largo del siglo XX (Fig. 2.68). Estos fenómenos nuevos para la ciencia fueron retratados en vivo por las emulsiones fotográficas del momento, las más de las veces sin intermediación de artificio óptico alguno, por lo que pueden ser considerados parte del universo electrográfico. Igualmente puede decirse del osciloscopio, que recibirá atención aparte. Tan sólo, adelantar en este capítulo que los primeros tubos de rayos catódicos que lograron la formación de imágenes al proyectar los haces



*Fig. 2.64 Dispositivo de guillotina con estilete y diapasón accionado eléctricamente para medir la velocidad de un obturador. Landy.*

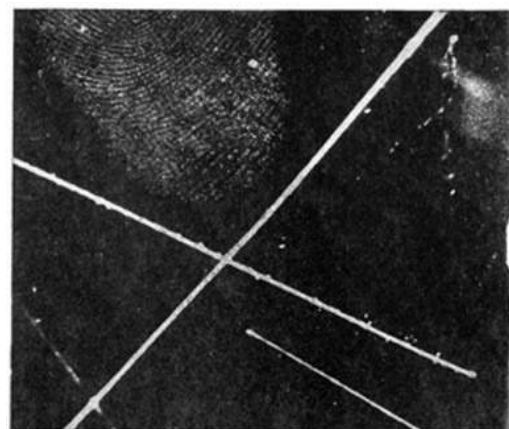


*Fig. 2.65 Fotografías de Rayos positivos. 1913. J. J Thomson.*

de electrones sobre las paredes internas del propio vidrio, encontraron su primera aplicación en este importante invento. Básicamente, se trata de un tubo de rayos catódicos que permite la visualización gráfica en el tiempo de las oscilaciones producidas por las corrientes y por los fenómenos acústicos. En este contexto, la fotografía desempeñó un papel determinante tan pronto como los científicos demandaron de la fijación de esas imágenes para un análisis detenido, o para

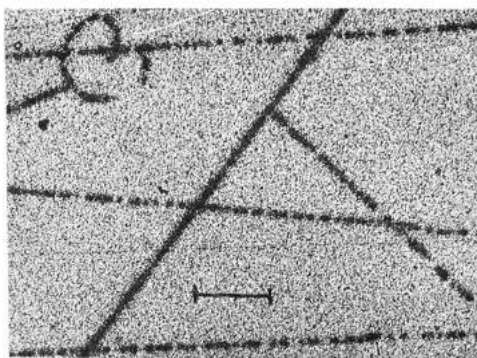
contar con un registro objetivo y permanente de los fenómenos. El osciloscopio se convirtió, de esta forma, en oscilógrafo. Algunas formas rudimentarias y primitivas del oscilógrafo se construyeron siguiendo el esquema de los primeros utensilios electrográficos del XIX, mediante espejos giratorios en vez del tubo de rayos catódicos. Estos ensayos obedecieron más a motivos didácticos que experimentales, especialmente para mostrar a los neófitos la formación de las figuras sinusoidales producidas por las ondas eléctricas y acústicas (Fig. 2.69).

*Fig. 2.66 Descargas eléctricas producidas en tubos de vacío. 1879. Fenómenos de estratificación. De la Rue y Müller.*

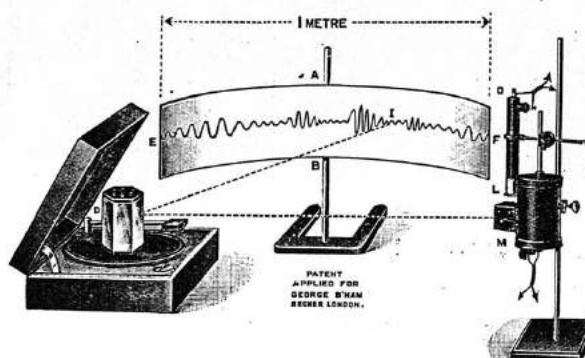


*Fig. 2.67. Átomos de helio y electrones moviéndose rápidamente. Véase la marca de la huella digital. CTR. Wilson. 1928, aprox.*

Los procedimientos electrográficos, en sus múltiples acepciones, han participado de lleno en el devenir de la ciencia y la tecnología a lo largo del siglo XX, encontrando aplicaciones muy diversas, normalmente dentro de disciplinas científicas que germinaron en siglos precedentes. Como botón de muestra de algunas aplicaciones en las que la fotografía estuvo muy presente, valga recordar algunos ejemplos paradigmáticos, no sin antes decir que ha sido la conjunción de las técnicas fotográficas convencionales con las primeras formas de producción de imagen electrónica, especialmente las derivadas del tubo de rayos catódicos, la fórmula más utilizada durante la mayor parte de este siglo. En el terreno de la fisiología no cesó la experimentación, siendo la oscilografía una de las herramientas más utilizadas en el registro de las señales eléctricas producidas por los diferentes órganos, llegándose a cubrir áreas hasta entonces inaccesibles con sensores cada vez más especializados y con técnicas más refinadas (Fig. 2.70). En el campo de la ingeniería eléctrica, la oscilografía ha estado presente también

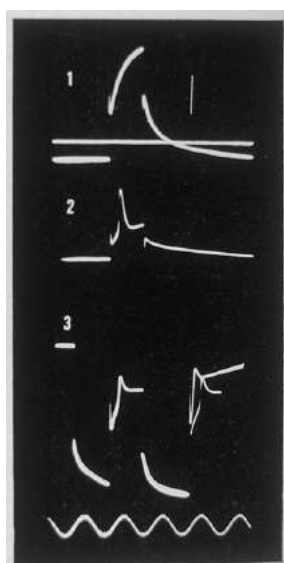


*Fig. 2.68. Ampliación de negativo de cámara de burbujas. Derrick. 1962. Kodak Panatomic X film.*



*Fig. 2.69. Aparato para mostrar gráficamente las corrientes alternas y los fenómenos acústicos. 1936.*

en el control de las redes eléctricas y en el conjunto de los sistemas de transmisión de las distintas tecnologías de telecomunicaciones. El registro oscilográfico del voltaje de los reactores nucleares es un ejemplo de ello (Fig. 2.71). En el campo de los programas espaciales, los impulsos de las señales recogidas tanto en película fotográfica como por medios electrónicos, procedentes de las distintas sondas, satélites y naves enviados al espacio, ha sido una constante hasta nuestros días. Esta fue una de las áreas en las que los procedimientos fotográficos convencionales comenzaron a ser sustituidos por las diferentes formas de imagen

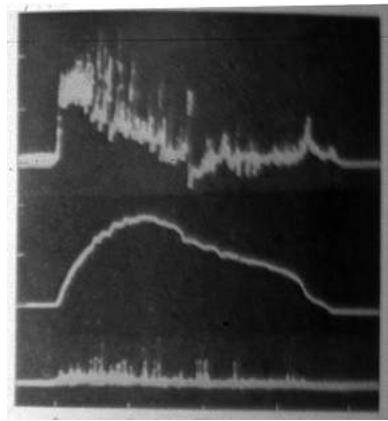


*Fig. 2.70. Señales eléctricas producidas por músculos de ranas inmersos en una solución de Ringer sin calcio. 1960.*

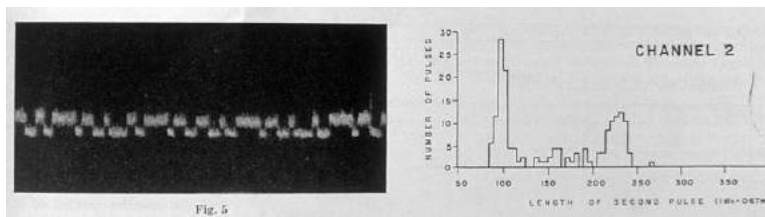
digital, a partir de finales de los sesenta. Sirvan de ejemplo en este contexto, los pulsos de radiación emitidos por el Sputnik, primer satélite artificial de la historia, a su paso por Australia, presentados a la vez de una forma gráfica y fotográfica (Fig. 2.72). En el ámbito de los estudios de los fenómenos de alta velocidad, la combinación de imagen fotográfica y representación gráfica de los fenómenos supuso también una de las técnicas más utilizadas, tanto para el análisis de los datos como para la comunicación de resultados (Fig. 2.73).

La incorporación de la tecnología informática a la investigación científica, con la llegada de los grandes ordenadores en los años posteriores al final de la II Guerra Mundial, y la simbiosis creada con las distintas técnicas electrónicas de captación

de imágenes, tales como escáneres, sensores electrónicos, tubos de imagen, etc., abrieron un nuevo campo a la exploración y al análisis de las imágenes recibidas. En el campo de la astronomía, esta combinación de técnicas fue decisiva a la hora de poder procesar, almacenar y presentar de la manera más práctica y visual posible con medios informáticos la multitud de imágenes procedentes de los observatorios y de las sondas. El Mark 1, en pleno funcionamiento a mediados de los sesenta, acometía estas funciones a partir del escaneado de las imágenes fotográficas y de los impulsos pertenecientes a los fenómenos celestes, tal como quedaban presentados en la pantalla del osciloscopio (Fig. 2.74). Las técnicas de escaneado electrónico de imágenes, en combinación con los recursos facilitados por la informática, se aplicaron también en otros campos de la ciencia, tales como la biología, donde se empleó en el reconocimiento de imágenes de células en fechas tan tempranas como mediados de los sesenta. En esta ocasión, los impulsos electrónicos provenientes del escaneado de las imágenes fueron procesados informáticamente por el ordenador Sirius, de Ferranti, lo que facilitó las tareas de identificación, catalogación y almacenamiento de las mismas (Fig. 2.75).



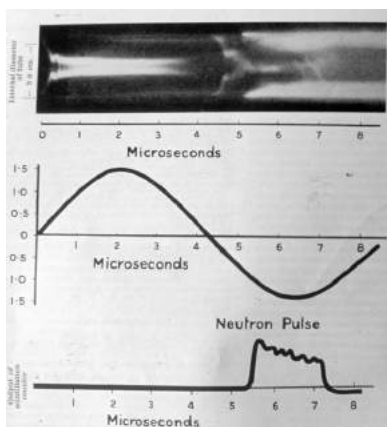
**Fig. 2.71. Registro oscilográfico del voltaje, reactor termonuclear Zeta, Harwell. 1958.**



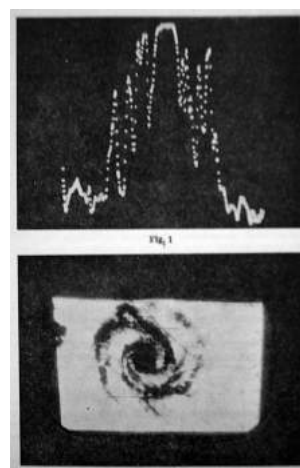
**Fig. 2.72. Fotografía y diagrama de los pulsos de radiación emitidos por el Sputnik en su paso por Australia. 1959.**

El conjunto de los sistemas electrográficos está íntimamente ligado a la amplia gama de mecanismos electrónicos generados a lo largo del siglo XX, incluido los propios ordenadores, que

han hecho también uso de este tipo de representaciones. La frontera que existe entre los aparatos electrónicos destinados al cálculo o al registro gráfico de resultados y los ordenadores, se muestra diluida en el espacio y en el tiempo. Los distintos modelos de calculadoras, tabuladoras y de dispositivos electrónicos de registro, como el de la figura (Fig. 2.76) pertenecen a la misma línea de desarrollo tecnológico que los ordenadores, pero entre unos y otros existe un rasgo conceptual y operativo que los separa, determinado por el esquema lógico que utilizan. El ordenador supone un estadio superior de desarrollo de este tipo de máquinas, al regirse por el concepto lógico- matemático de *máquina universal* o de



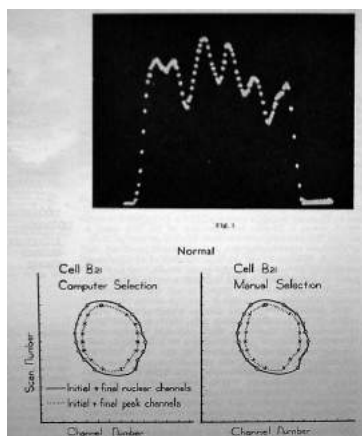
**Fig. 2.73 Fotografía de barrido de una descarga en deuterio con una corriente en forma de onda y una salida en pulso de neutrón. 1959.**



**Fig. 2.74. Escaneado de fotografías con el Mark 1. Lectura, almacenado y análisis. Arriba escaneado de una fotografía de la nebulosa M51; abajo tal como aparece la nebulosa en el monitor del CRT. 1965.**



*programa almacenado*, que es el que establece la frontera entre ambos. En cambio, un aspecto fundamental que los une es la utilización de las mismas técnicas de representación gráfica y de generación de imágenes. La tendencia general en este sentido ha estado marcada por la paulatina sustitución, como soporte de registro, del papel fotográfico común por monitores basados en la tecnología de tubos o, más recientemente, de plasma, o de cristal líquido. La proliferación de los monitores hoy día como instrumento de visualización, de simulación y de representación gráfica de fenómenos, hace que la delimitación entre técnicas electrográficas y electrofotográficas quede muy difuminada y que se considere un asunto del pasado.



**Fig. 2.75.**  
*Escaneado de fotografías de células cervicales, los datos o puntos del monitor se pueden transferir a través de cinta al ordenador (Sirius de Ferranti) 1965.*



**Fig. 2.76.**  
*Registradora electrónica. Kent Mark 1962.*

### 2.4.2. De la electrofotografía a la reprografía

Un motivo de confusión entre los significados que tienen estos dos tipos de técnicas ha sido el haberles atribuido un mismo origen histórico en las figuras de Lichtenberg, y no haber marcado posteriormente un punto de separación o caminos de desarrollo diferentes. Así, vemos cómo la electrofotografía, en un primer momento, pasó a representar los sistemas reprográficos que surgieron a mediados de la década de los treinta del siglo XX, especialmente con la salida al mercado de la xerografía en Estados Unidos. Sin embargo, a finales de la década de los sesenta de este mismo siglo, volvió a aparecer el término electrofotografía, pero abarcando un mayor número de técnicas de adquisición y producción de imágenes, esta vez más allá de los puramente reprográficos, y en aquellos donde los procesos fotoeléctricos desempeñaban un papel de primera necesidad. Así el campo semántico de la electrofotografía se abrió a áreas de aplicación como fueron la electrorradiografía e ionografía, la fotoconductividad y los fotorreceptores, el electrofax, los diversos procesos electrónicos de impresión y de visualización y la fotografía electrónica, que comenzaba a emitir sus primeros balbuceos<sup>66</sup>. Este panorama volvió a sufrir una profunda revisión tras la llegada de la tecnología digital, con la aparición de la tecnología CCD, a principios de los setenta. En todo este período de transición numerosas técnicas, próximas a la electrofotografía recibieron el nombre de *técnicas fotográficas no convencionales*, o *fotografía sin sales de plata* (Silverless photography). Esta es la razón por la que en este capítulo de introducción a la electrofotografía tan sólo atenderemos a su primera acepción, más definitoria, que es la reprográfica, dejando para capítulos posteriores (ver Cap 5.4) el conjunto de las *técnicas fotográficas no convencionales* y el de la tecnología fax, muy próxima a los procedimientos reprográficos, y que atenderemos en el



próximo capítulo dedicado a la transmisión de imágenes a distancia. Ante esta proliferación masiva y constante de nuevos medios de producción de imagen tecnológica, es importante señalar que ha habido serias propuestas, no faltas de razón, de que sea el término reprografía el que aglutine y dé cabida semántica al conjunto de todos estos instrumentos dedicados a la captación y reproducción de imágenes.

La electrofotografía, por tanto, hace mención directa al conjunto de procedimientos fotográficos en los que la imagen se forma por los cambios que se producen en las propiedades eléctricas de un material que ha sido expuesto a la luz<sup>67</sup>. El proceso cubre pasos muy parecidos a los de la fotografía de las sales de plata, al formarse una imagen latente que luego debe ser revelada. La diferencia esencial entre ambos procedimientos radica en que el responsable de la formación de la imagen latente en este caso es el fenómeno de la fotoconducción, mientras que en la fotografía son los procesos fotoquímicos. Encontramos, por tanto, en la electrofotografía, un material sensible que experimenta cambios en su resistencia eléctrica, en conformidad con aquellas partes afectadas en mayor o menor medida por la luz. En este primer paso, se forma una imagen latente, a semejanza de la reducción que sufren las sales de plata de las emulsiones fotográficas convencionales, debido también al impacto de la luz. La siguiente fase del proceso electrofotográfico, que se correspondería con el revelado convencional, se lleva a cabo mediante un proceso electrostático. Una sustancia cargada eléctricamente, normalmente en forma de polvo (*toner*), se adhiere al material sensibilizado, normalmente fabricado con papel resistente o con materiales sintéticos. En esta imagen latente, las zonas cargadas eléctricamente representarían las sombras, y las que carecen de carga, las luces altas. Esto hace que la adherencia del toner a ellas dependa de la distribución de tonos de la imagen original que se pretende reproducir. Por último, la fase de fijación de la imagen se lleva a cabo normalmente con la aplicación de calor intenso, encargado de adherir el polvo a la superficie en cuestión.

El término electrofotografía fue propuesto por primera vez a principios del siglo XX por el húngaro Paul Selenyi, al presentar un método de reproducción de imágenes que hacía uso de un haz de electrones, o de iones, que se proyectaba sobre determinadas superficies aislantes. Posteriormente, estos materiales eran revelados mediante algún tipo de sustancia en polvo que se adhería a aquellas partes más o menos electrizadas. A partir de estas primeras experiencias, la electrofotografía se asoció mayormente a las técnicas de reproducción y copiado de documentos, indistintamente de textos o imágenes, y a unas características de reproducción claramente identificables: tono continuo, baja resolución y alto contraste.

Los antecedentes históricos de este tipo de técnicas reproductivas se atribuyen también a George Christoph Lichtenberg, dado que la producción de sus imágenes se llevó a cabo por procedimientos muy similares. No obstante, aunque el concepto de formación de las imágenes es el mismo, existen algunas diferencias notables, dado que este autor aplicó los procesos electrostáticos a procesos de grabación muy alejados de los puramente reproductivos, en un entorno eminentemente experimental y sobre materiales diversos como resinas naturales o arena. En 1842, Ronalds, basándose en las experiencias de Lichtenberg, encontró una aplicación práctica a este método, construyendo un dispositivo electrostático que grababa los cambios atmosféricos<sup>68</sup>. El uso de papel cargado eléctricamente por medios electrolíticos se remonta a 1842-1847, concretamente a los trabajos de Alexander Bain. Este autor, ligado al campo de las telecomunicaciones -fue inventor de un telégrafo eléctrico- propuso un sistema de grabación del papel consistente en hacerlo pasar a través de dos electrodos. Una derivación de esta técnica la

aplicaría luego a la transmisión de imágenes por vía telegráfica. En 1875, T. A. Edison perfeccionó este método, presentando nuevas patentes.

Sin embargo, no fue hasta principios del siglo XX que la electrofotografía, como técnica de reproducción por medios electrostáticos de documentos de textos y de imágenes, no alcanzó su mayoría de edad, especialmente al ser demandada por una nueva realidad social en la que la información iba convirtiéndose en uno de los pilares decisivos para el avance económico de los países. Las nuevas sociedades industriales reclamaban cada vez más herramientas capaces de procesar la información originada por nuevos fenómenos sociales, como el incremento de la población en los países más industrializados ante la llegada masiva de inmigrantes, un elemento éste crucial para la creación de los primeros censos; los nuevos sistemas sanitarios, la seguridad social, seguros privados, etc. Toda esta actividad surgida en torno a nuevas empresas de servicios y a oficinas de gobiernos y estados originó una nueva capa social formada por administrativos, gestores y oficinistas de toda índole a la que se encargó el procesamiento de toda esta nueva información, con los nuevos utensilios aportados por la informática. No fue, por tanto, sorprendente que la industria se fijara en estos medios electrostáticos de reproducción de documentos, que ya por entonces venían aplicándose en otros sectores de la industria como el textil, la cerámica o el papel, entre otras razones, por la simplicidad de funcionamiento, rapidez y capacidad para ser transmitidos a distancia. La búsqueda de un producto comercial de este tipo animó la imaginación de los científicos. En 1905, Gavritschewsky consiguió formar imágenes de objetos al superponerlos sobre placas de ebonita polarizada, utilizando radioactividad y revelándolas con polvo de sulfuro de minio. Esta misma técnica se ensayó posteriormente con radiaciones ultravioleta y rayos X. Pero el paso decisivo en esta andadura lo dieron compañías como la Westinghouse, al incorporar al mercado en 1933 un procedimiento electrofotográfico que fue utilizado principalmente por la prensa como medio reprográfico y como instrumento para la transmisión de fotografías a distancia<sup>69</sup>. La convivencia en el seno de la electrofotografía de la fotografía convencional con las nuevas formas de registro estuvo al orden del día; no sólo en el envío a distancia de fotografías, sino también en la reproducción de documentos, que se levó a cabo en un principio sobre papel y películas fotográficos.

La incorporación masiva de este tipo de técnicas de reproducción a la industria se produjo en torno a los años previos a la segunda guerra mundial, especialmente en Estados Unidos. Es cuando surgió el término de *xerografía*, que representa la técnica reprográfica más común y cuyo modelo de funcionamiento llega hasta nuestros días. La xerografía vino de la mano de Chester F. Carlson, quien ensayó múltiples fórmulas a partir de 1935. En 1938 presentó sus primeros resultados de imágenes electrofotográficas producidas con planchas de metal revestidas de una capa fina de selenio vitrificado, y que eran sensibilizadas mediante descargas luminosas producidas por un conductor. La impresión del papel se producía al entrar en contacto con la plancha, una vez que el metal había atraído el toner a sus zonas electrizadas por la acción de la luz. El vertiginoso desarrollo de la ciencia de la foteolectricidad en aquellos años, en parte debido al empuje de la incipiente industria televisiva, fue decisivo para lograr afianzar esta técnica con nuevos procedimientos electrónicos y para que pudiera ser lanzada al mercado. La presentación de patentes de métodos electrofotográficos de reproducción y de envío de documentos e imágenes en los años de la guerra fue imparable, asentando las bases de una nueva industria cuyo crecimiento ha sido constante hasta nuestros días. Con el tiempo fueron apareciendo nuevas técnicas electrofotográficas para cubrir las necesidades de la industria, incorporando nuevos procedimientos técnicos, en especial los procedentes del campo de la electrónica. En particular, nos encontramos con el escáner y el electrofax, dos procedimientos muy próximos a la reprografía, con un gran impacto en el desarrollo

de las técnicas de captación y transmisión de imágenes. Ambos recibirán una atención más individualizada en el capítulo dedicado a las técnicas fotoeléctricas (ver Cap. 4.2), y en el que sigue a continuación, dedicado a la transmisión de imágenes a distancia.

### 2.4.3. Primeras transmisiones de imágenes a distancia por medios eléctricos

Las telecomunicaciones han estado tradicionalmente ligadas a la producción y transmisión de imagen tecnológica. Desde las primeras formas adoptadas por el telégrafo óptico, con el que se enviaban mensajes entre distancias cortas, no más de lo que permitía el uso de unos anteojos con los que ver los semáforos de brazos articulados emplazados en las zonas altas del terreno, hasta el desarrollo de los sensores CCD, salidos a la luz en uno de los centros de investigación más destacados del campo de las telecomunicaciones, los laboratorios Bell, la imagen técnica se ha beneficiado ampliamente del empuje de este sector tecnológico. Y volvemos a encontrar aquí la dicotomía texto-imagen que salió a relucir en capítulos anteriores. Las telecomunicaciones, en su conjunto, han fluctuado en sus investigaciones y en sus prácticas entre estos dos polos que marcan de una forma determinante sus comunicaciones. Los elementos visuales se han sucedido y combinado constantemente con las palabras y los textos, en un camino de encuentros y desencuentros que ha llegado a la interdependencia que exigen los actuales sistemas de comunicación, en los que imagen y palabra oral y escrita se ofrecen de forma simultánea.

Para empezar, el telégrafo óptico, desarrollado en el siglo XVIII y fuertemente impulsado por las guerras napoleónicas, se fundamentó en un código estrictamente visual, que hacía posible la transmisión de los mensajes de torre en torre hasta llegar a su destino, que en ocasiones se situaba a cientos de kilómetros de distancia. También los primeros telégrafos eléctricos surgidos en la historia, a principios del siglo XIX, normalmente de funcionamiento electrostático o electroquímico, solían apoyarse en elementos visuales que eran posteriormente traducidos a palabras. El *telégrafo electroquímico* de Sömmering emitía burbujas que señalaban cada una de las letras; el de Dyer cambiaba el tono de un papel tornasol con los mismos fines; el de Coxe descomponía sales metálicas; el de G. R. Smith, presentado en la Gran Exposición



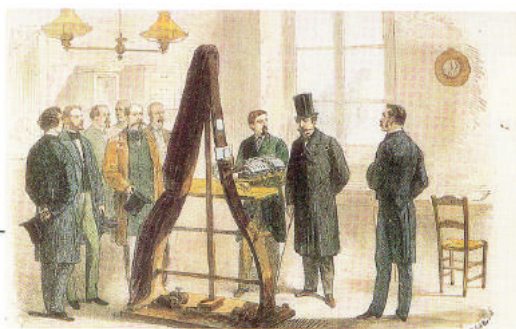
Fig. 2.77. Telégrafo de G. R. Smith, presentado a la Gran Exposición de Londres de 1851.



Fig. 2.78. Paloma mensajera con cápsula contenedora de microfilm atada a su pata. Finales del XIX

de Londres de 1851, y denominado "*telégrafo electro- cómico*"<sup>70</sup> utilizaba una careta que movía los ojos y la boca en conformidad con los impulsos recibidos (Fig. 2.77). Todo ello es indicativo de una aspiración que ha estado siempre presente en la industria de las telecomunicaciones, y que no es otra que integrar la imagen de los hablantes en la comunicación, algo que no se conseguiría hasta la llegada del videoteléfono. Tampoco vendría mal recordar aquí que las telecomunicaciones utilizando palomas mensajeras estuvieron muy ligadas al campo de la fotografía, concretamente de la microfotografía, tal como fueron empleados los primeros rollos de microfilms, encapsulados y

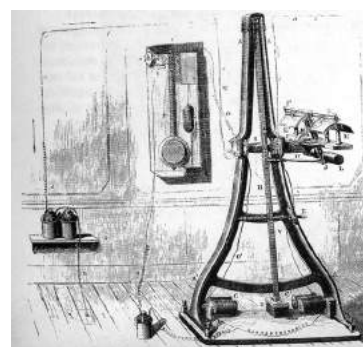




*Fig. 2.79. Telégrafo de Caselli en tiempos de Napoleón III.*

rayas; el segundo, directamente con signos alfanuméricos. Esta documentación escrita de los mensajes supuso un salto cualitativo en las telecomunicaciones a distancia, especialmente si tenemos en cuenta que los usuarios principales de estas formas de comunicación fueron las empresas mercantiles transcontinentales, repartidas a lo largo de las rutas hacia las colonias; las agencias de información y los periódicos, creados a la par que el telégrafo; y las empresas de seguros, agencias marítimas, ferrocarriles, o el propio ejército. Para todas estas entidades resultaba esencial poder disponer de un registro documental de sus comunicaciones, a ser posible con valor legal. El telégrafo eléctrico, junto a las nuevas formas de transporte desarrolladas en este siglo, desencadenó un proceso de internacionalización progresiva que llega hasta nuestros días y que afecta a todos los ámbitos de nuestras vidas.

Si en un primer momento las telecomunicaciones se vieron satisfechas por esta posibilidad de enviar y recibir mensajes escritos a la velocidad de la luz y por toda la geografía mundial, pronto hubo también la necesidad de transmitir imágenes. Las agencias de información, muy ligadas a la bolsa, los periódicos y los cuerpos de policía fueron los más interesados en un proyecto, que ya contaba con algunas experiencias previas. Como la de Alexander Bain (ver Cap. anterior), que en 1841, un año antes de la aparición del telégrafo Morse, construyó un artilugio muy rudimentario capaz de transmitir imágenes muy esquemáticas y simples<sup>71</sup>. En esta línea destaca también la labor del inglés F. C. Bakewell, que consiguió años más tarde resultados parecidos con un telégrafo electroquímico. Sin embargo, fue Abbé G. Caselli el primero en obtener resultados más prácticos y comerciales en la Francia de 1855, mediante un sistema de telegrafía destinado primordialmente a la transmisión de manuscritos, copias facsímiles de documentos e imágenes simples, tales como dibujos en blanco y negro o firmas (Fig. 2.79 y 2.80 y ver Fig. 2.15). Este instrumento, denominado *pantelégrafo*, consiguió enviar imágenes de este tipo a 800 kilómetros, distancia existente entre París y Marsella, durante el gobierno de Napoleón III<sup>72</sup>. El sincronismo entre receptor y emisor hacía necesario el uso de péndulos de más de dos metros, cuya amplitud de oscilación era mantenida por electroimanes<sup>73</sup>. El procedimiento utilizado era de carácter electromecánico, con ayuda de un estilete que reproducía literalmente el dibujo a medida que iba recibiendo los impulsos eléctricos acordes con el documento original. La invención del teléfono, a principios de los setenta, despertó aún más este interés de la sociedad por conseguir medios de comunicación que incorporasen la imagen junto a los mensajes de textos o, desde entonces, de voz.



*Fig. 2.80. Transmisor de telegrafía de facsímil de Caselli. Para mensaje manuscritos e imágenes simples.*



El sueño de poder contarse en aquellas fechas con un *foto-teléfono* quedó de manifiesto en las ilustraciones de la época (Fig. 2.81).

Ante la omnipresencia de la fotografía en la segunda mitad del siglo XIX, la telegrafía de imágenes pronto se volcó en investigar fórmulas de transmisión menos sofisticadas, que pudieran cubrir las exigencias de calidad que requería este tipo de imágenes. Dichas aspiraciones comenzaron a ser cubiertas por los primeros estudios realizados sobre las propiedades fotoeléctricas del selenio, en la segunda mitad del siglo. George Carey propuso en 1875<sup>74</sup> un sistema de transmisión de imágenes, fijas o en movimiento, que haría uso de un conjunto de células de selenio como elemento receptor de la luminosidad, y de un determinado número de cables para llevar a cabo la transmisión. El modelo requería un cable para cada una de las señales captadas, que debían ser posteriormente reagrupadas para lograr la reproducción de la imagen original. Una idea muy loable, por proponer un esquema de funcionamiento precursor de las futuras tecnologías televisivas, pero de difícil aplicación, más aún con los medios tecnológicos disponibles en ese momento. Al año siguiente, Shelford Bidwell propuso la construcción de una cámara oscura a la que se podría aplicar una capa de selenio como elemento detector, lo que haría posible una lectura progresiva de las imágenes con tan sólo desplazar la cámara. Esta propuesta establece un claro antecedente de las futuras técnicas de escaneado que, como podemos ver, nacen en el seno de las telecomunicaciones, ámbito en el que encontrarán una gran aplicación, especialmente en la tecnología fax y en la televisión.



Fig. 2.81. Ilustración de un fototeléfono imaginario. Finales del XIX.

La ciencia fotoeléctrica, por su parte, comenzó a experimentar un gran avance en la década de los ochenta, concretamente a partir de las investigaciones de Wilhelm Hallwachs, precursor de la construcción de las primeras células fotoeléctricas por Elster y Geitel, en 1888. Los primeros en aplicar estos conocimientos a la transmisión de imágenes a distancia fueron Arthur Korn y Eduard Belin, quienes abrieron el campo a la *fototelegrafía*. Korn se basó en la tecnología que años antes había desarrollado Willen Einthoven para su electrocardiograma, consistente en un galvanómetro de cuerda, y en sus conocimientos de los cambios que se producen en la resistencia del selenio por acción de la luz y del control necesario que se debe hacer para evitar la inercia de respuesta del mismo. Como fuente de iluminación ideó un tubo accionado por un relé de chispas, que le permitió transmitir las primeras fotografías de modo experimental en el París de 1902. La transmisión de imágenes a distancia, de forma comercial y mediante la tecnología de Korn, se materializó con los primeros envíos de fotografías que se hicieron entre diferentes periódicos de Berlín, París y Londres, en 1907<sup>75</sup>. En esta ocasión, la recepción de la señal se hizo directamente sobre un objetivo, cuya lente dejaba pasar mayor o menor cantidad de luz, dependiendo de los tonos de la imagen original. Este proceso permitía la sensibilización de un papel o película fotográfica adosado a un tambor de ebonita, dando lugar a una imagen muy similar en cuanto a contraste y resolución, a las producidas por las técnicas de huecograbado de medios tonos. (ver cap. 2.6.4.).

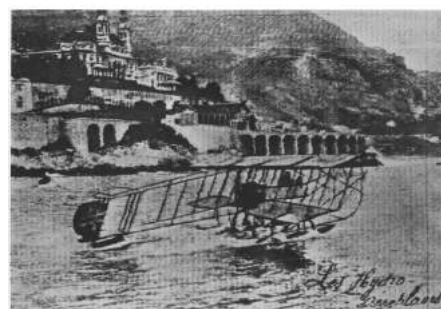


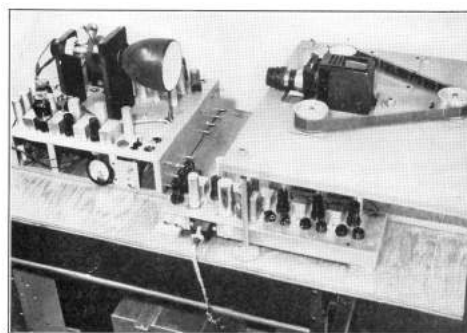
Fig. 2.82. Transmisión telegráfica de fotografía entre París y Mónaco. 1912.



*Fig. 2.83. Fotografía enviada de Manchester a Londres, mediante el Telectrografo de Thorne- Baker. 1910.*

Pronto, los sistemas de telefotografía proliferaron por Europa. En Francia, Belin desarrolló el suyo propio en 1907, dando origen a sus *belinogramas* y a la denominada *teleautografía*, que causó una gran sensación en la sociedad de la época (Fig. 2.82). En Inglaterra, Thorne Baker construyó en 1910 el *telectrografo*, inspirado en los trabajos previos de Bakewell y utilizado preferentemente por los periódicos para el envío de fotografías impresas en medios tonos (Fig. 2.83). Los primeros envíos de imágenes se hicieron fundamentalmente por medio de la red telegráfica, debiéndose esperar hasta 1922 para que se lograra la transmisión por radio, en conexiones transatlánticas. A partir de estos años fue preciso convenir entre el emisor y el receptor el momento exacto de la transmisión, mediante la

generación de un tono que hacía posible la perfecta sincronización de las señales, algo que aún comprobamos en algunos sistemas de envío por fax. La tecnología de entonces, cuyo esquema de funcionamiento está muy cercano al actual, consistió en el uso de un tambor giratorio en el que se emplazaba la imagen, y cuyo movimiento quedaba sincronizado por un diapasón. La imagen era explorada de izquierda a derecha por un haz de luz, al ritmo marcado por el giro del tambor, y sus intensidades eran recogidas por un conjunto de células fotoeléctricas encargadas de transformar esta energía luminosa en impulsos eléctricos. De este modo, los impulsos quedaban modulados de acuerdo a la intensidad de la luz recibida, que se correspondía a su vez con los diferentes tonos de grises de la fotografía original escaneada. En el receptor se producía el camino inverso, lográndose la copia sobre un tambor, cuyo movimiento debía estar perfectamente sincronizado con las señales de origen. Esta misma tecnología comenzó a aplicarse en estos mismos años a los primeros artilugios que hicieron posible el cine sonoro. Con el tiempo, la teleautografía, tal como la había concebido Belin, cobró una mayor aceptación por permitir que fuera el propio sistema de control de la inercia de respuesta de las células de selenio el que fijara de forma automática el ritmo de transmisión. Aún así, por ejemplo, el envío de una fotografía por estos procedimientos hacia 1922, entre Roma y Nueva York, podía demorarse hasta cuarenta minutos, lo que hacía muy difícil la rentabilidad del sistema<sup>76</sup>. Para superar estas dificultades se pusieron en práctica durante algunos años sistemas combinados de escaneado electrónico del tipo descrito hasta ahora con películas cinematográficas en las que se fotografiaba de forma reducida los documentos y las imágenes que se querían transmitir (Fig. 2.84). Esta fórmula ahorró tiempo de transmisión, pero presentó el inconveniente de hacer necesario los respectivos revelados de las películas tanto en la emisión como en la recepción de las imágenes, por lo que fue pronto abandonada en beneficio de la nueva tecnología electrónica de fax.



*Fig. 2.84. Escáner con uso de película fotográfica. V. Zworykin. c.a. 1930*

El avance de estas primeras tecnologías de envío de imágenes a distancia se produjo principalmente gracias a la consolidación de la electrónica, cuya tecnología superó con creces la capacidad de los sistemas electromecánicos existentes hasta entonces. Este proceso se constató fehacientemente con la llegada de la televisión electrónica y el consiguiente abandono de sistemas de televisión electromecánica

propuestos anteriormente, como era el *disco explorador de Nipkow* o el modelo de Baird. En el terreno de las telecomunicaciones proliferaron múltiples intentos encaminados a desarrollar un sistema de videoteléfono, algo que no se consiguió hasta principios de la década de los cincuenta, con escasa aceptación por parte del mercado. En este contexto es preciso subrayar la resistencia que a lo largo de la historia ha manifestado el público en general hacia sistemas de comunicación que pudieran suponer una intromisión en sus vidas privadas, especialmente a través de la imagen en vivo de los hablantes. La primera entrada de las telecomunicaciones en la vida doméstica se produjo con la llegada del teléfono<sup>77</sup>, desde entonces el mercado se resiste a aceptar fórmulas de comunicación que vayan más lejos de lo que permiten los textos escritos o la voz.



Fig. 2.85. Transmisión digital 1921.  
Bartlane.

En estos primeros años del siglo XX tuvieron lugar una serie de experiencias en el campo de las telecomunicaciones que es importante reseñar, por constituir un antecedente directo de la tecnología digital que tanta importancia tiene en las actuales técnicas de captación y reproducción de imágenes. Los primeros intentos de digitalización se llevaron a cabo en los sistemas de codificación de señales, desarrollados específicamente para la transmisión de imágenes a través de los primeros cables submarinos telefónicos, tendidos entre Londres y Nueva York, siendo su principal cliente la industria periodística de uno y otro lado del Atlántico. Una de las tecnologías que más destacó fue la *Bartlane*, que codificaba las imágenes en cinco niveles distintos de luminosidad, y utilizaba una cinta codificada con una impresora telegráfica con tipos de impresión especiales que simulaban una trama de medios tonos (Fig. 2.85). A los pocos años se empleó el mismo sistema, codificando las señales en quince niveles de luminosidad y sustituyendo el modo de reproducción de la imagen en la estación terminal con



Fig. 2.86. Transmisión digital 1929.  
Bartlane



Fig. 2.87. Imagen  
alfanumérica. D'Albe. 1923.

medios fotográficos<sup>78</sup> (Fig. 2.86). Estos primeros intentos se realizaron a nivel puramente experimental, pues hubo que esperar al desarrollo de los grandes ordenadores digitales de la posguerra y al lanzamiento de los primeros programas espaciales de exploración de la Luna y de Marte en la década de los sesenta, para que se comenzaran a obtener resultados de mayor trascendencia. Otro modelo propuesto en estas fechas, pero que no pasó tampoco de ser una simple propuesta experimental, fue el de E. E. Fournier D'Albe, en el que la imagen quedaba dividida en un entramado de cuadrados pequeños a los que se les asignaba un nivel de brillo concreto, de acuerdo a la imagen original. Seis letras elegidas del alfabeto representarían una densidad fotográfica determinada, con lo que el emisor y el receptor podrían fácilmente



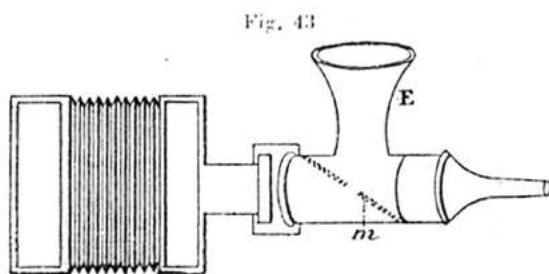


Fig. 2.88. Cámara de Cohn para endoscopia del oído.  
Ilustración de Khoeler. *Les Applications de la Photographie*. 1892

ponerse de acuerdo dictándose una tras otra, e ir completando los cuadros con pequeñas manchas negras, de mayor o menor tamaño, de acuerdo con la escala de opacidad adoptada (Fig. 2.87).

Un capítulo aparte merece la endoscopia, un procedimiento de captación de imágenes a distancia, que puede aplicarse a recorridos muy cortos, como puede ser al fotografiarse el oído interno, la laringe o a cualquier otro órgano

interno de un sujeto por medio de un endoscopio acoplado al objetivo de la cámara, o a recorridos tan largos como permiten los modernos sistemas de exploración por fibra óptica, que a su vez pueden ser manejados a distancia y transmitidos en directo a cualquier parte del mundo, vía satélite. Los orígenes de este tipo de prácticas se encuentran en la segunda mitad del siglo XIX, tan pronto como los médicos comenzaron a idear una serie de artilugios endoscópicos que les permitieran explorar el interior de los órganos del cuerpo humano con la ayuda de las cámaras, sistemas de iluminación y emulsiones disponibles en aquel momento. El fondo del ojo, la laringe o el oído interno fueron los primeros órganos elegidos, pero pronto se comenzó a aplicar a otras partes del cuerpo, como la vejiga, el estómago, el recto, etc.,. Surgieron así el endoscopio de Desormeaux, el cistoscopio de Küntner, o los diferentes rectoscopios y gastroscopios que se acoplaron a los objetivos de las cámaras<sup>79</sup>. Las primeras fotografías del interior del oído se hicieron por medio de un espéculo con una ranura que permitía la entrada de luz natural; pero pronto se inventaron nuevos y más sofisticados artilugios, como la cámara de Cohn (Fig. 2.88), construida *ad hoc* para tales fines, con una ventana para recibir la iluminación natural. Para la exploración de vejiga y otros órganos internos se idearon una serie de endoscopios que llevaban incorporados sistemas ópticos que permitían la entrada de luz procedente de lámparas incandescentes (Fig. 2.89). A finales de siglo se comenzó a barajar la idea de fabricar una cámara minúscula que pudiera ser introducida en el interior de los diferentes órganos, coincidiendo con la llegada de los rayos X, bautizados en un primer momento como la *nueva fotografía*. Estos primeros intentos de endoscopia fotográfica llevaron a los investigadores a estudiar también la posibilidad de nuevos modelos de cámara que permitieran observar y fotografiar los órganos a un mismo tiempo, lo que ayudó con toda seguridad al desarrollo de las primeras cámaras reflex, por medio de visores y juegos de espejos.<sup>80</sup>

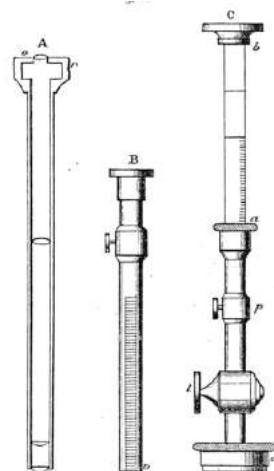


Fig. 2.89. Endoscopia.  
Ilustración de Khoeler, *Les Applications de la Photographie*. 1892.

Las diferentes tecnologías de transmisión de imágenes a distancia siguieron su curso a lo largo del siglo XX, desempeñando un papel de primer orden en el desarrollo de los distintos tipos de imagen tecnológica. La endoscopia ha experimentado un gran avance gracias al desarrollo de la fibra óptica y de los endorreceptores, que han posibilitado la captación de impulsos internos de órganos animales y humanos con un nivel de detalle hasta hace poco insospechado. Por su parte, la llegada de las primeras redes informáticas en la década de los sesenta para fines de defensa y de reservas de vuelo (Sage y



Sabre) impulsaron el desarrollo de terminales en los que la imagen fue adquiriendo cada vez más protagonismo, hasta llegar a los actuales terminales domésticos conectados a Internet, donde conviven los diferentes medios de comunicación. De otro lado, los programas espaciales han supuesto una verdadera punta de lanza del avance de la digitalización de las señales, especialmente para hacer posible el envío de grandes cantidades de imágenes desde el espacio exterior. La industria de las telecomunicaciones en este contexto, ha desempeñado un papel de vanguardia en todo este proceso, especialmente a raíz del desarrollo de las primeras centrales de conmutación digitales y de la invención de los propios CCD, tecnologías ambas nacidas a principios de los setenta. La tecnología de escáneres se ha visto ampliamente potenciada por el desarrollo tecnológico experimentado por el fax en este mismo sector. En todo este desarrollo ha sido crucial el refinamiento técnico y el grado de conocimiento conseguido en nuestros días en torno a la tecnología electrónica y, por extensión, a la de autómatas lógicos, lo que ha repercutido de forma directa en el perfeccionamiento de los sensores de estado sólido y de los procesadores de imagen presentes en cada uno de los artilugios de captación y reproducción de imagen tecnológica de nuestros días.

## 2.5. La electricidad en la fotografía: obturadores, fotometría e iluminación artificial.

Para que se produzca el fenómeno fotográfico tan solo se necesita de una placa emulsionada con alguna sustancia fotosensible, luz suficiente y algún medio para la fijación de la imagen. De esa forma nacieron las primeras fotografías, hechas por contacto con láminas expuestas al sol, tal como vemos en la reproducción que llevó a cabo Niépce del grabado del cardenal D'Amboise (Ver Figura 2.17). Posteriormente, estas primeras placas de metal embadurnadas con betún o con las primeras sales de plata fueron depositadas en el interior de cámaras oscuras, método con el que se obtuvieron las primeras fotografías en perspectiva, como la que consiguió hacer el mismo Niépce desde la ventana de su casa en



Fig. 2.90. Vista de La Gras. 1826.  
Nicéphore Niépce.

Le Gras, que puede ser considerada la primera fotografía de la historia que se conserva (Fig. 2.90). A partir de este momento, la cámara oscura fue acomodándose a las necesidades de la fotografía, incorporando nuevas y mejores lentes que permitieran la concentración del haz de luz y que proporcionaran más nitidez y luminosidad a las imágenes; espejos y prismas, mecanismos disparadores y de obturación, portaplacas, fuelles para conseguir un enfoque variable, etc. En esta primera fase de construcción de la cámara fotográfica asistimos a un proceso de transformación, consistente en la incorporación paulatina de dispositivos mecánicos a unos aparatos que hasta el momento habían sido fabricados casi exclusivamente en madera y cuero. Pero la demanda de nuevas mejoras fue constante por parte de los fotógrafos, científicos y artistas. Los tiempos de exposición necesarios para la captación de las escenas eran extremadamente largos, hecho que se traducía en imágenes borrosas, producidas por el movimiento de los objetos o de la propia cámara. (Fig. 2.91). Los



Fig. 2.91. Soporte de cabeza, c. 1868.  
Silla para posar, c. 1882.

primeros obturadores fueron manuales, la misma tapa de cuero que cubría el objetivo o una pequeña portezuela que se operaba en el interior de un saco negro, operados manualmente, valían para tales efectos; este modo rudimentario no supuso un gran problema entonces, debido a la escasa velocidad de reacción de las emulsiones y a los tiempos de exposición necesarios tan prolongados. La medición de la luz se hacía también por medios muy toscos e imprecisos, conforme a parámetros de valor relativo y con procedimientos fotométricos escasamente estandarizados. A todo ello se añadieron otras limitaciones propias de los procesos fotoquímicos del momento; por ejemplo, las emulsiones, además de ser poco sensibles, estaban sujetas a una franja muy reducida del espectro, y los procesos de laboratorio, de revelado, fijado y secado, eran muy laboriosos. Ante esta situación de estancamiento de la tecnología fotográfica, los científicos no cesaron en la búsqueda de nuevos compuestos químicos que dieran lugar a emulsiones más sensibles, procedimientos de laboratorio más rápidos y efectivos, y utensilios que permitieran la fabricación de nuevos obturadores, nuevas fuentes de iluminación y nuevas técnicas fotométricas. Ante esta demanda resultó de gran ayuda el rápido avance que experimentaba por entonces la ciencia de la electricidad, abriendo en un primer momento una nueva fase de desarrollo, caracterizada por la incorporación de dispositivos de funcionamiento electromecánico y por la aparición de las primeras formas de producción de luz artificial. Más tarde, se inició una segunda fase en esta andadura hacia mayores niveles de automatización, con la entrada en escena de la tecnología electrónica. En definitiva, durante la segunda mitad del siglo XIX, fueron tres las áreas de la fotografía que se beneficiaron preferentemente por la entrada en escena de los dispositivos eléctricos: los obturadores, la fotometría y las fuentes de iluminación.

### **2.5.1. Los obturadores**

La necesidad de idear nuevos obturadores más precisos y rápidos surgió en la segunda mitad del siglo XIX a medida que se fue imponiendo en la fotografía el concepto de *instantaneidad*. La captación de los movimientos fugaces requería de tiempos de exposición cada vez menores; los retratos estaban muy condicionados por los movimientos involuntarios del modelo o de la propia cámara, una limitación que redundó en copias difuminadas y borrosas, muy del agrado de los primeros fotógrafos pictorialistas, pero con escasa aceptación en el ámbito científico o en el documental. El instante captado en las escenas callejeras o en los retratos más casuales, desveló realidades, gestos y momentos nunca vistos. Como resaltó Walter Benjamin años más tarde, esto se produce a semejanza de las emociones o los recuerdos que escapan a nuestra conciencia, por lo que nos enfrentamos a una especie de *inconsciente óptico*, que sólo la cámara es capaz de desvelar<sup>81</sup>. Una vez superada la etapa de los primeros obturadores manuales, se comenzó la fabricación de dispositivos de obturación mecánicos con la ayuda de pequeñas palancas, diafragmas, artilugios neumáticos, resortes, etc. De este modo, la determinación de la celeridad de apertura y cierre de los obturadores se convirtió en un área de investigación destacada. Para estos fines se utilizaron procedimientos muy diversos, diapasones, estiletes de impresión o dispositivos eléctricos. Un primer método, que resulta muy ilustrativo del estado en el que se encontraba la tecnología del momento, fue el de M.M. Thury y Amey, ideado para calcular la velocidad de los primeros obturadores, en este caso, del tipo guillotina, que operaba con la liberación de un resorte. Se puso a prueba con el fin de establecer unas tablas de correspondencia entre el nivel de tensión del resorte y la velocidad de obturación<sup>82</sup>. El procedimiento seguía los siguientes pasos: un ayudante se situaba en el interior de un cuarto oscuro con el brazo extendido, con una pequeña lámpara incandescente de magnesio prendida de la mano; acto seguido, comenzaba a dar vueltas a razón de una revolución por segundo con un

movimiento lo más uniforme posible, de manera que la cámara fotográfica, provista del obturador en cuestión, llevaba a cabo sucesivas tomas a la vez que se anotaban los distintos tiempos de exposición. Una vez reveladas las placas, con la ayuda de un portaángulos se medía el arco de luz fotografiado y se hacía corresponder con el tiempo de apertura del obturador.

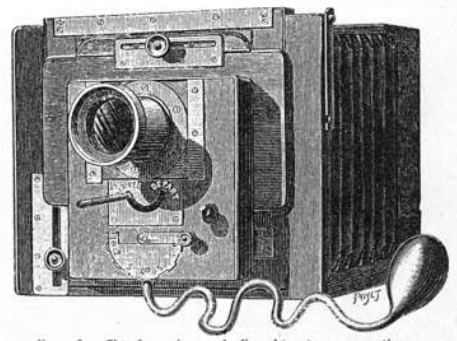


Fig. 2.92. Cámara oscura con obturador neumático

Los sistemas de obturación se construyeron, en un primer momento, como mecanismos externos que se acoplaban a la cámara o que funcionaban independientemente. Con los años comenzaron a ser integrados en las mismas, pudiéndose diferenciar entre el sistema de obturación propiamente dicho y el mecanismo disparador, consistente, por lo general, en liberar un resorte mediante la acción de un gatillo, un émbolo neumático o una pequeña palanca (Fig. 2.92). Los sistemas de obturación mecánicos pronto se definieron por varias fórmulas básicas que se han mantenido vigentes hasta nuestros días. Los más utilizados, dentro de una primera modalidad en la que el mecanismo se encuentra emplazado en el sistema óptico de la cámara, fueron el de iris o de *diafragma* y el de *sector*. En cambio, el más destacado entre aquellos situados en el plano focal de la cámara, fue el de *cortinilla*. En el campo de la cinematografía encontramos el rotatorio, que funciona con las variaciones que se llevan a cabo con la apertura de diafragma en el plano de la lente.

El conjunto de todas estas técnicas, de funcionamiento eminentemente mecánico, se puso pronto a prueba en las numerosas investigaciones que se llevaron a cabo por entonces en el campo de la cronofotografía, que fue una de las áreas tradicionalmente más involucradas en el desarrollo de este tipo de dispositivos. La construcción de artilugios tan sorprendentes e ingeniosos como fueron el *fusil* y el *revólver* fotográficos de Marey y Enjalbert, respectivamente, son bien ilustrativos del grado de pericia y originalidad que se consiguió con la técnica del momento (Fig. 2.93 y 2.94). La incorporación de los dispositivos eléctricos a los sistemas de obturación fue, en un primer momento, en los mecanismos disparadores preferentemente, siendo el electroimán el dispositivo más utilizado (Fig. 2.95).

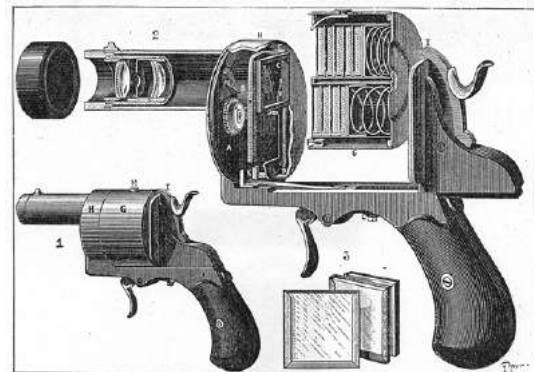


Fig. 2.93. Revólver fotográfico de M. Enjalbert. 1882.

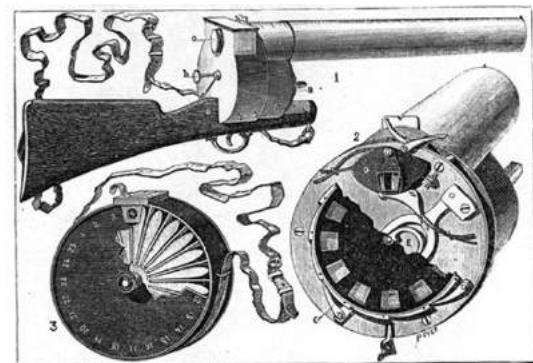


Fig. 2.94. Fusil fotográfico. (detalles) 1882. E. J. Marey.

Con el paso de los años, la determinación de la velocidad de los obturadores comenzó a llevarse a cabo con la ayuda de diapasones y de estiletos accionados por condensadores eléctricos (Fig. 2.96). M. A. Londe ideó un dispositivo de estas características, comentado en el



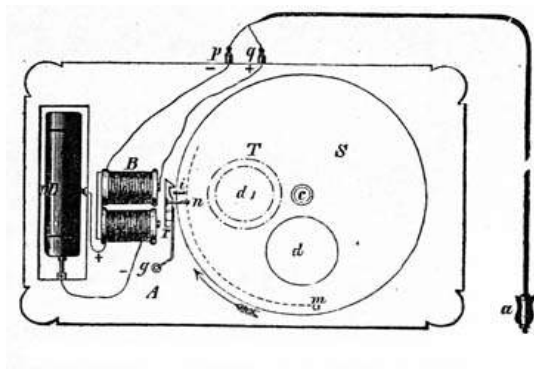


Fig. 2.95. Obturador de funcionamiento eléctrico. 1888.

capítulo dedicado a la electrografía (Ver Fig. 2.53), con el que pudo fijar los tiempos de apertura de un obturador de guillotina al relacionar el trazado que un estilete hacía sobre un papel ahumado con las vibraciones emitidas por un diapasón. Si el estilete se movía a razón de cien vibraciones por segundo y eran seis las vibraciones registradas en el papel en el tiempo de apertura de la guillotina, se deducía una exposición de 6/100 segundos, y así sucesivamente. Posteriormente, Landy propuso, para los mismos fines, la utilización de diapasones correspondientes a las diferentes notas musicales, de los que se conoce el número

de vibraciones que emiten por segundo.

Los estudios sobre cronofotografía también demandaron la intervención de otros mecanismos eléctricos que con el tiempo adquirieron gran importancia, como fueron los de iluminación estroboscópica, mediante flashes, y los mecanismos de múltiples exposiciones, sincronizadas de forma automática por medio de dispositivos de relojería accionados eléctricamente (Fig. 2.97). Estos últimos, muy utilizados en fotografía astronómica para la observación y toma fotográfica continuadas del movimiento de astros y estrellas, representan un claro antecedente del cinematógrafo. Fue en el seno de la cronofotografía, donde la técnica de obturación consiguió un desarrollo más especializado, dado que la captación de los fenómenos de alta velocidad se consigue mediante la combinación de estos dos procedimientos: con la rapidez de obturación y con las distintas fuentes y técnicas de iluminación, especialmente con la estroboscópica. Con el tiempo, los disparadores accionados por electroimán fueron sustituidos por los de relés electromecánicos, que, a su vez, fueron sustituidos posteriormente por los de actuación electrónica, mediante el uso de fototubos y células fotoeléctricas. La tecnología electrónica de emisión de pulsos eléctricos, correspondientes a fracciones de tiempo tan reducidos como nanosegundos es una de las técnicas con mayor trascendencia en los laboratorios de hoy día, lo que es indicativo del interés de la ciencia por conseguir observar realidades y fenómenos en porciones de tiempo cada vez más pequeñas. Este camino, que de momento no encuentra límites, y que ha motivado la creación de la *femtociencia*, una nueva rama de la física dedicada al estudio de este tipo de fenómenos, ahonda en ese prurito que tiene la ciencia por abarcar lo inobservable, algo que comparte con otras ramas de la fotografía dedicadas a escudriñar en lo diminuto y en lo lejano, y que están representadas fundamentalmente por la fotomicrografía y la fotografía astronómica, respectivamente.

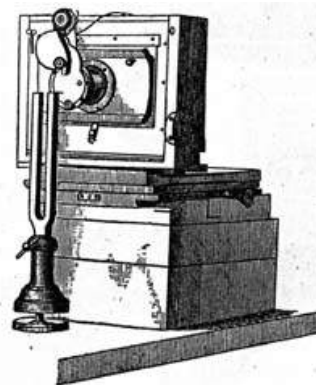


Fig. 2.96. Determinación de la rapidez de un obturador mediante un diapasón. c.a. 1890.

La entrada en escena de la tecnología de la imagen dependiente de la física del estado sólido, presenta el término *exposición* como el proceso de acumulación de energía que se produce sobre un determinado sensor en un determinado período de tiempo, ya sea película fotográfica, vidicom o CCD. La calidad de la imagen,



desde la perspectiva del movimiento, es medida por el grado de borrosidad que presenta; y este parámetro viene dado, principalmente, por la velocidad del objeto (o de la cámara), el nivel de iluminación y la sensibilidad del sensor; y, en menor medida, por la resolución de este último, el ángulo de incidencia formado por la luz procedente del objeto y el plano del sensor, y por el grado de aumentos que forme el sistema óptico<sup>83</sup>. En este sentido, la terminología ha ido acoplándose a los avances introducidos por los nuevos sistemas de producción de imagen tecnológica. El camino de depuración

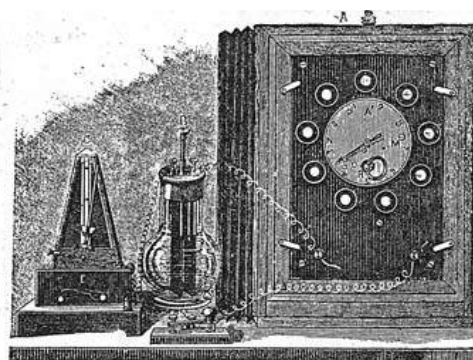


Fig. 2.97. Aparato fotoeléctrico de A. Londe

en este sentido ha sido largo, si atendemos al hecho de que los sistemas de obturación se deben, en líneas generales, a la formulación de la *Ley de Reciprocidad* de Bunsen-Roscoe, de 1862, enunciada con la finalidad de delimitar matemáticamente la exposición, en relación con el tiempo y la intensidad lumínica. Desde entonces, la captación de los objetos móviles se lleva a cabo bien reduciendo el tiempo de exposición, bien aumentando la intensidad lumínica. Esta ley general sufrió con el tiempo una serie de precisiones, a medida que el conocimiento de los compuestos fotosensibles fue creciendo y que la fabricación de las emulsiones adoptó fórmulas más prácticas y estandarizadas. El *error de reciprocidad* fue una de las primeras observaciones hechas a esta ley, al advertirse que el aumento progresivo del tiempo de exposición del material fotográfico no mantiene una relación directa con los niveles de densidad mostrada en las placas o en las películas. A partir de un determinado momento, por más que aumentemos el tiempo de exposición, o lo que es lo mismo, la intensidad de la luz, no conseguimos mejores resultados en la imagen resultante. Años más tarde, esta correspondencia entre exposición, tiempo e intensidad, quedó fijada de una forma más precisa por las investigaciones de Hurter y Driffield, cuyos resultados quedaron gráficamente explicitados en la conocida *curva característica*. En el ámbito de la imagen electrónica, esta relación se manifiesta de forma más lineal, pudiendo ser favorecida con fotomultiplicadores e intensificadores de imagen, lo que es indicativo de un cambio de paradigma que no sólo afecta a la terminología de la imagen, sino a sus conceptos y principios más básicos.

*La obturación es esencialmente un muestreo temporal de una escena radiante.*<sup>84</sup>

En la imagen electrónica, este muestreo se puede llevar a cabo en el propio sensor, controlando la velocidad de obturación, o con el control del tiempo de emisión de luz. El concepto de obturación, en este sentido, ha trascendido el de los primeros sistemas antes reseñados, propios del primer siglo de existencia de la fotografía, fundamentalmente de funcionamiento manual, mecánico o electromecánico, para entrar en una nueva dimensión, caracterizada por la aparición de los obturadores electrónicos. Estos son activados fundamentalmente por células fotoeléctricas, por dispositivos electro-ópticos, que emiten pulsos eléctricos que afectan la transparencia del sistema óptico captador de la imagen,<sup>85</sup> o por sistemas electrónicos de estado sólido, que actúan desde dentro del propio sensor, delimitando el nivel de carga que puede ser acumulado por un fotosensor en particular (ver Cap. 6.3.3.).

### 2.5.2. La fotometría

Es importante señalar que la ciencia de la fotometría es muy anterior a la aparición de la fotografía, y que, como en el caso de los obturadores, sufrió una gran transformación como resultado de la aparición de los mecanismos eléctricos. El proceso histórico nos muestra una adaptación paulatina de los primeros métodos fotométricos, fundamentados mayormente en procesos físico- químicos tradicionales, a los procedimientos más ligados al electromagnetismo, ciencia que irrumpió con una fuerza inusitada en el panorama industrial, de las comunicaciones y de los laboratorios científicos de mediados del siglo XIX. De aquí, la importancia de delimitar los conceptos, las relaciones y los campos de acción de la fotometría y de la fotografía antes de iniciar nuestro recorrido histórico. Recordemos que la fotometría es una rama de la ciencia dedicada a la medición de los niveles de luminancia o brillo de las fuentes de luz y de los objetos radiantes, sean naturales o artificiales. Dentro de esta ciencia, se encuentra la fotometría fotográfica, que es un área de aplicación y de desarrollo particular que la fotometría presenta en relación con los instrumentos fotográficos, y que está dedicada casi con exclusividad a determinar los niveles de exposición adecuados para cada uno de los materiales fotosensibles fabricados en el ámbito general de las tecnologías de la imagen. Desde esta perspectiva, la fotografía debe ser contemplada como un instrumento científico más, que la fotometría ha utilizado durante años para su desarrollo, tal como ha sucedido con los diferentes fotómetros, células fotoeléctricas o con los actuales sensores de estado sólido.

La primera etapa de la fotometría se inicia un siglo antes de la aparición de la fotografía, y es en este período cuando se formulan sus principios más generales y se establece una serie de procedimientos experimentales de gran trascendencia en el futuro de esta disciplina. En 1729, Pierre Bouguer (1698-1758) publica un ensayo en el que se recogen diferentes técnicas para la comparación de las intensidades lumínicas pertenecientes a diferentes fuentes de luz<sup>86</sup>. El uso del papel traslúcido fue por lo común uno de los procedimientos más empleados. Hacia 1750, este mismo autor señaló las diferencias existentes entre los conceptos de intensidad lumínica, iluminancia y luminancia, con gran repercusión en el futuro desarrollo de la fotometría. En 1760, aparece otro ensayo sobre fotometría, esta vez del científico y matemático Johann Heinrich Lambert (1728-1777) en el que ya se enuncian con claridad y rigor matemáticos las leyes fundamentales de esta ciencia: la ley de la suma de iluminaciones, la del cuadrado inverso a la distancia, ya enunciada por Bouguer, y la del coseno de la iluminación y la emisión, entre otras. Lambert ideó también un *fotómetro de sombras* similar al que construyó años más tarde Benjamin Thompson, conde Rumford, acompañado esta vez de un tratado sobre la medición comparativa de diversas fuentes de luz. Ambos fotómetros, el de Bouguer y el de Lambert-Rumford, operaban mediante mecanismos similares: mientras que en el primero era una pared divisora lo que delimitaba la iluminación en ambas superficies, en el segundo, fue un objeto que proporcionaba una sombra. En definitiva, en ambos casos se trataba de comparar la proyección de dos fuentes de luz sobre una superficie, una técnica que está en la base de toda fotometría.

El primer fotómetro de funcionamiento eminentemente químico surgió a finales del XVIII de la mano de Horace B. de Sausurre (1740-1799)<sup>87</sup>. Este autor, inspirado en las investigaciones de Berthollet sobre la acción de la luz en el agua clorada, hizo numerosas pruebas en diferentes altitudes de las montañas alpinas, con el fin de estudiar el efecto del sol en este compuesto. Como resultado de sus estudios, concluyó que la liberación de oxígeno era proporcional a la cantidad de luz recibida. Sus pesquisas sobre el comportamiento de la luz se extendieron a otras áreas, como al análisis de los efectos producidos por ésta en los colores, hecho

que le condujo a la invención del *cianómetro*, instrumento para la medición de la intensidad del azul del cielo; o al estudio comparativo de la intensidad de la luz en distintos niveles de transparencia en el aire, experiencias que redundaron en la fabricación del *diafanómetro*.

A finales de este siglo, las investigaciones encaminadas a comprender la acción de la luz sobre distintos materiales cobraron un gran realce, una vez que la fotoquímica comenzó a mostrar sus señas de identidad como rama independiente dentro de la química. Los químicos Senebier y Berthollet estudiaron la acción de la luz en aceites, tinturas y pigmentos de diversa índole. Y las investigaciones de Johann Heinrich Schultze (1687- 1744) sobre las propiedades de los metales y sustancias luminosas, unido a la comprobación en 1727 de la capacidad de ennegrecimiento de las sales de plata ante la luz, despertaron un interés generalizado de los científicos por la fotoquímica y, en particular, por el comportamiento de este tipo de sales. Dentro de este contexto, Vasalli presentó en 1791 el resultado de sus trabajos sobre la acción de la luz en las sales de plata, línea de investigación que prosiguieron Davy y Wedgwood, con resultados muy próximos al descubrimiento de la fotografía como tal; pues, tan sólo les faltó encontrar un modo de fijar las imágenes. Como resultado de estos estudios, Marsiglio Landriani construyó un fotómetro basado en la reacción de las sales de plata ante la luz. Por su parte, L. A. Planché comprobó el efecto que producía la luz sobre las sales de mercurio, hecho en el que se basó Josef M. Eder para construir posteriormente su fotómetro<sup>88</sup>. El interés por este tipo de sales llegó también a España; en Salamanca, J. L. Casaseca investigó a partir de 1826 la acción del óxido de nitrato de plata en sustancias vegetales tales como el caucho, azúcar, almidón, harina, vino, té, café, etc., comprobando, entre otras cosas, la formación de plata metálica por reducción de las distintas disoluciones y el efecto precipitador que presentaban sustancias como el amoníaco, el potasio o la sosa<sup>89</sup>.

En los primeros años del siglo XIX las interrelaciones entre los fenómenos eléctricos y los químicos fueron ampliamente estudiadas, entre otros, por Davy, Berzelius y Freiherr von Grothuss. Este último comenzó por describir en 1817 las leyes de absorción fotoquímica, con las que puso de manifiesto que es la cantidad de luz absorbida la que produce los cambios químicos en los compuestos, y no la temperatura como se pensaba hasta entonces. Y fue el primero en argumentar que los procesos fotoquímicos producidos en las sales de plata pueden ser explicados como resultado de la acción de las propiedades eléctricas de la luz. Este conjunto de ideas fueron fruto de la experimentación prolongada que este autor llevó a cabo con las reacciones que determinados cristales, de diferentes tonos y de diferentes índices de absorción, presentan ante algunos tipos de luz. Con los años, estas investigaciones fueron de gran ayuda en la fabricación de la primeras emulsiones fotográficas para color.

La fotometría, por su parte, siguió avanzando: en 1814 se presentó un sencillo método fotométrico, ideado por W. A. Lampadius. El instrumento estuvo inspirado en una idea de François Marie, formulada con anterioridad al mismo tratado de Bouger, que consistía en interponer superficies semitransparentes, normalmente láminas óseas, entre la fuente de luz y el observador, hasta que aquella llegaba a extinguirse. Esta idea de fotómetro por *extinción* se retomaría años más tarde para la medición de las magnitudes estelares. El *fotómetro de cuñas* de William Ritchie introdujo un nuevo concepto en la medición fotométrica, al incorporar dos espejos, emplazados en un ángulo de 45°, que recogían la luz de dos fuentes separadas, proyectándolas a su vez en una superficie de papel traslúcido. Al poco tiempo, este mismo autor presentó una nueva versión del mismo, colocando diferentes capas de papel blanco mate sobre los propios espejos y comparando directamente el brillo de ambos. En realidad, se trataba de variaciones del de Brouguer, pero con

la ventaja proporcionada por el prisma, que delimitaba con precisión el efecto producido por las fuentes de luz. En el futuro, este procedimiento óptico, caracterizado por el empleo de un sistema de cuñas, regulador de las diferentes intensidades de luz, fue de gran utilidad y aplicación en multitud de instrumentos ópticos. En estos primeros años del XIX, apareció también el *fotómetro polarizador* de Malus y Arago, que opera con prismas de doble refracción. La polarización se convirtió con el tiempo en una técnica de control de la intensidad lumínica con una gran aceptación en el campo de la fotometría de alta precisión y en espectrofotometría.

La irrupción de la electricidad en los métodos fotométricos supuso un cambio sustancial en esta ciencia, a la par que abrió un nuevo período de desarrollo que llega hasta nuestros días. El primer paso en este sentido vino de la mano de uno de los grandes científicos del XIX, ya nombrado prolijamente en estas páginas y muy ligado a la historia de la fotografía: Edmond Becquerel. En 1839, este científico francés descubrió el fenómeno fotovoltáico, asentando con ello uno de los pilares de la futura ciencia de la fotoelectricidad y abriendo nuevas posibilidades a la investigación en fotometría. Presentó sus conclusiones al comprobar que la luz produce una corriente galvánica cuando incide en una de las dos placas de metal inmersas, a modo de electrodos, en un baño alcalino o ácido, ya sean de platino, oro o plata. También constató que la corriente aumenta cuando la placa está recubierta con sales de plata, como el cloruro, el yoduro o el bromuro. Dos años más tarde construyó su fotómetro electroquímico, basado en este efecto fotogalvánico o *efecto Becquerel*. Que duda cabe que, la fotometría se benefició extraordinariamente de la llegada de la ciencia de la fotoelectricidad y más concretamente del desarrollo de los diferentes tipos de células fotoeléctricas.

A un mismo tiempo, la fotografía fue presentada en sociedad ante la Academia de las Ciencias de París, atrayendo la atención de los científicos, entre ellos, los dedicados al campo de la fotometría. Estos comprendieron el gran potencial que presentaba el nuevo invento para su disciplina, más aún, cuando se vislumbró una posible alianza con los métodos eléctricos. El propio Daguerre, encargado de la presentación en público del nuevo invento, se interesó por la reacción que podrían tener los daguerrotipos ante la corriente eléctrica (ver Cap. 2.8.3.). Con este propósito, aplicó electricidad a las placas fotográficas durante el tiempo de exposición, pero no consiguió resultados muy relevantes. Fue el propio Becquerel quien dio muestras fehacientes de la reducción química que la electricidad provoca en las sales de plata, al igual que ocurre con la luz. Lo demostró mediante descargas eléctricas aplicada a los daguerrotipos, y revelándolos con vapor de mercurio. Como vimos en el capítulo anterior, fueron estos ensayos los que tuvieron una incidencia directa en las primeras formas de la electrografía.

Hacia mediados de siglo se produjo un salto cualitativo de gran importancia en la fotoquímica y en la fotometría como resultado de las investigaciones que Bunsen y Roscoe llevaron a cabo en estas dos disciplinas. Sus experimentos con el gas cloro les dio a conocer su poder detonador cuando es expuesto a la luz. Este descubrimiento les sirvió para formular las primeras leyes de sensitometría del material fotográfico y para proponer la construcción de un fotómetro. Unos años antes, J. W. Draper, uno de los primeros astrónomos dedicados a fotografiar la luna, realizó experimentos parecidos con fines de encontrar un procedimiento fotométrico. Sin embargo, fueron estos autores los que consiguieron dar un carácter científico a las mediciones y al comportamiento de estas reacciones. R. W. Bunsen (1811- 1899) y H. E. Roscoe (1833-1915) denominaron este fenómeno “inducción fotoquímica” y comprobaron cómo la acción de la luz sigue una serie de pasos o estados en su incidencia sobre los compuestos químicos. Al principio, la reacción se produce de forma muy lenta, luego de forma proporcional a los niveles



de exposición, y por último, vuelve a ralentizarse. Este esquema interpretativo fue un verdadero precursor de las futuras leyes de la sensitometría fotográfica. A partir de 1858, estudiaron con este criterio y por métodos fotográficos, los distintos efectos que produce la luz solar, directa o difusa, y la acción de la atmósfera sobre la propagación de la luz. Este bagaje de experiencias, unido a estudios posteriores realizados con papel impregnado de cloruro de plata, fue decisivo para presentar en 1862 la *Ley de Reciprocidad* del material fotográfico o Ley de Bunsen-Roscoe, de una forma científica y con criterios de fotometría. Es bien ilustrativo recordar que los obturadores utilizados por estos autores para el estudio de la acción de la luz en las mezclas de cloro e hidrógeno presentes en el gas detonante consistieron en una serie de tablas de madera, emplazadas en el tejado de sus laboratorios; o que la fijación del gris estándar o gris medio, utilizado en sensitometría, y que en la actualidad queda definido por el 18 por ciento de reflectancia o punto medio en una escala geométrica entre el blanco y el negro, la determinaron mezclando una milésima parte de óxido de zinc y una de hollín.

El conjunto de la fotometría de estos años comenzó a ser abundantemente aplicada en diferentes ramas científicas como la botánica, la fisiología vegetal y la meteorología; especialmente, la instrumentación más común y próxima a la fotografía, como fue el fotómetro de Bunsen, basado en el uso de papel impregnado de cloruro de plata, o el de extinción, consistente en la colocación de sucesivas capas de láminas semitransparentes de sales de plata entre el objeto y la fuente de luz. Los fotómetros de escala o de gradiente, por superposición de tiras de más o menos transparencia, abrieron una nueva era en la fotometría fotográfica.

A un mismo tiempo, la experimentación continuó en el ámbito del electromagnetismo, dando lugar a estudios muy significativos sobre la relación existente entre la luz, la electricidad y los materiales fotosensibles. Si, en 1839, Becquerel pudo comprobar el efecto foto voltaico que la luz produce en un baño galvánico, en 1851, J. W. Hittorf demostró que existen sustancias, en especial el selenio metálico, que tienen la propiedad de ser más o menos conductoras dependiendo de la temperatura a que son expuestas. El selenio ya había sido descubierto en 1817 por el eminente científico Berzelius, concretamente en los baños residuales de las fábricas de depuración del ácido sulfúrico, destinado a la creciente industria metalúrgica europea. Pero fue Willoughby Smith el que descubrió de forma accidental, en 1873, las propiedades del selenio ante la luz. En aquel momento, este material era utilizado para mejorar la señalización y las mediciones que se llevaban a cabo en el tendido de uno de los primeros cables submarinos que por la época comenzaban a unir telegráficamente Inglaterra con el continente; entre otras razones por su alta resistencia. Un colaborador de Smith comprobó que su resistencia además de ser muy variable, dependía de la mayor o menor presencia de luz. Este hecho obligó a descartar la idea de Hittorf, que atribuía esta cualidad a la temperatura del sol, abriendo muchas expectativas en el campo científico e industrial. Hasta tal punto que se llegó a proponer en esos años, tan lejanos aún de la fibra óptica, la posibilidad de transmitir información mediante la luz. Pero fueron proyectos más pragmáticos y comerciales, como los del industrial Werner Siemens y su recién creada empresa, los que dedicaron una mayor atención a las propiedades conductoras de este material. En muy pocos años, el selenio comenzó a ser utilizado en multitud de áreas tecnológicas gracias a la aparición de las primeras células fotoeléctricas, que pasaron a desempeñar un papel privilegiado en áreas tan diversas como la medición de la intensidad de la luz, en las transmisiones eléctricas y telegráficas, en fonófonos, y en medios de comunicación de masas tan novedosos en aquellos años como el cine, concretamente para la grabación de películas sonoras; o en la propia televisión.

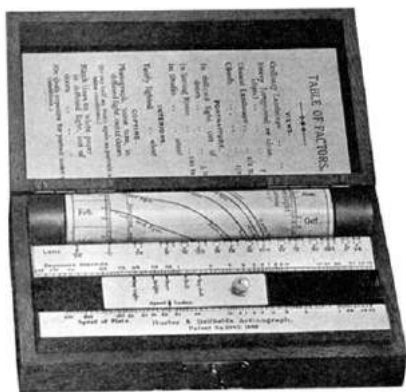


Fig. 2.98. Actinógrafo de Hurter y Driffield. 1888.

En los años posteriores a la aparición del selenio, la sensitometría, ciencia muy ligada a los estudios fotométricos, gozó también de un gran desarrollo. En páginas anteriores, vimos cómo Hurter y Driffield establecieron en 1888 tablas muy completas al respecto, con la ayuda de su *actinógrafo*. En realidad, la actinografía<sup>90</sup>, hoy día en desuso, es una variedad de fotometría<sup>90</sup>, dedicada a proporcionar escalas relativas de las distintas intensidades de la luz solar a lo largo del día y en distintas condiciones atmosféricas en relación con los materiales fotográficos existentes (Fig. 2.98). Posteriormente se aplicó también a la luz artificial. En 1880, Leon Warnerke ideó el primer sensitómetro comercial en Inglaterra para la medición de la sensibilidad de las placas de gelatina en seco al bromuro de plata. Consistió en una escala de gelatina marcada con tinta china en una superficie graduada, siendo la fuente de luz una lámpara de magnesio. Este sensitómetro posibilitó una fabricación más precisa de las placas fotográficas, y su catalogación en diferentes grados de contraste. El sensitómetro de Warnerke fue superado por los de rueda rotatoria, desarrollados, entre otros, por Bunsen y Roscoe (1862), Ernst Mach (1865), y Hurter y Driffield (1890). Sin embargo, los densitómetros y microdensitómetros basados en tecnología de células fotoeléctricas acabaron por imponerse con el tiempo.

La ciencia de la fotoelectricidad recibió un nuevo impulso con la formulación de los principios fundamentales del electromagnetismo, por James C. Maxwell en su *Tratado sobre la Electricidad y el Magnetismo* de 1873. A su vez, la experimentación en este terreno no se interrumpió, muy al contrario fue realzada con la presencia en los laboratorios de los tubos de vacío y de los diversos dispositivos de producción de descargas eléctricas. La validación experimental de las nuevas teorías de Maxwell, en especial de la que afirma que la luz representa una forma más del electromagnetismo, vino de la mano de Heinrich Hertz y sus experimentos con descargas producidas por bobinas de inducción del tipo Ruhmkorff. Hertz estudiaba en aquellos años el comportamiento de las ondas eléctricas y de las oscilaciones producidas en los distintos medios materiales, atraído por las teorías de Maxwell y por los experimentos con los que B. W. Feddersen había demostrado unos años antes que las chispas producidas por un inductor se componen de una serie de descargas parciales que oscilan en un sentido y otro<sup>91</sup>. Hertz comprobó en uno de sus experimentos que los destellos producidos por las descargas se dan con más intensidad si se producen en presencia de otra descarga, a diferencia de si éstas se encuentran separadas por una pantalla negra. La detección de las descargas fue hecha mediante un resonador en forma de aro que era lo suficientemente sensible como para detectar las descargas a pesar de la distancia que los separaba. Con el laboratorio a oscuras pudo comprobar cómo las descargas se propagaban en forma de pequeñas chispas a lo largo de la habitación hasta una distancia de dos metros. Este hecho le convenció de que las ondas electromagnéticas poseen las mismas características de propagación que la luz: reflexión, refracción, polarización, etc. Un año después, en 1887, descubrió el fenómeno fotoeléctrico al comprobar que el resonador era más sensible a las descargas cuando éste recibía descargas adicionales de otra bobina. Este fenómeno lo atribuyó a la acción de la radiación ultravioleta, tras constatar que la descarga aumentaba al poner un espejo entre las bobinas, hecho que confirmó de forma más precisa, anteponiendo un espectrómetro de cuarzo delante de la bobina, con el que controló el paso de las diferentes longitudes de onda. Efectivamente, esto le permitió observar que la

descarga en la bobina de medición aumentaba sólo cuando la radiación ultravioleta lograba pasar. Posteriormente, utilizó otras fuentes de luz ultravioleta a partir de destellos de magnesio, consiguiendo los mismos resultados.<sup>92</sup>

El fenómeno fotoeléctrico suscitó un gran interés en el seno de la ciencia. En 1888, Wilhem Hallwachs descubrió que la radiación afecta a la descarga sólo cuando incide sobre el polo negativo, lo que supuso en la fecha un dato de suma importancia. Para comprobar que la electricidad que se desprende de los cuerpos bajo el influjo de la radiación ultravioleta es de signo negativo se ayudó de un electroscope de hojas de oro; esto le permitió la detección de descargas muy pequeñas y la observación del trazo de las líneas de fuerza electrostáticas que se evidencian a su paso, hechos que no ocurren cuando se trata de una carga positiva. También demostró cómo un cuerpo aislado, y en principio sin carga, adquiere un potencial positivo como resultado de ser expuesto a luz ultravioleta<sup>93</sup>. El siguiente paso lo dio A. Righi ese mismo año, al comprobar que bajo el influjo de la radiación ultravioleta se podía producir una pequeña corriente, un dato de extrema importancia porque sirvió de inspiración para la construcción de las primeras células fotoeléctricas por emisión. Sin embargo, fueron Julius Elster y Hans Geitel los que proporcionaron un sentido práctico a todas estas experiencias a partir de 1890, al conseguir una acción fotoeléctrica más eficiente y controlada con la utilización de técnicas de vacío. Llegaron a esta conclusión tras una serie de experimentos con determinados compuestos químicos, y tras observar cómo unos eran más sensibles a las radiaciones que otros, especialmente los materiales alcalinos como el sodio y el potasio. Fue precisamente el hecho de observar que estos compuestos presentan el inconveniente de sufrir una oxidación muy rápida, lo que les condujo a emplazarlos dentro de los tubos de vacío, una idea determinante para comenzar la fabricación de los primeros fototubos o células fotoeléctricas por emisión.

A finales de siglo, la convivencia entre los distintos tipos de sistemas fotométricos era más que notable. Los fotoeléctricos comenzaron a desarrollar dos tipos básicos de células fotoeléctricas, las de fotoemisión, fundamentadas en el fenómeno fotoeléctrico, y las fotovoltáicas, nacidas de las experiencias de Becquerel<sup>94</sup>. Estos dispositivos, todavía en una fase de experimentación, comenzaron a ser acoplados a los telescopios en fechas tan tempranas como 1892, por Minchin, Monck, Dixon y Fidgerald, quienes llevaron a cabo unos primeros ensayos de fotometría estelar, principalmente de la luna, algunos planetas y estrellas cercanas<sup>95</sup>. Por su parte, los sistemas más convencionales, léase aquellos que operan con criterios fundamentalmente de contraste, de variación de distancias de las fuentes, de superposición de filtros neutros, o de utilización de prismas de polarización, a la hora de comparar las intensidades lumínicas, como es el caso de los fotómetros de Bunsen, el de Lummer- Brodhun, o el Martens, mantuvieron una gran presencia en los bancos ópticos de los laboratorios, prestando un gran servicio a la ingeniería eléctrica durante la mayor parte del siglo XX. Por último, la fotometría por medios fotográficos adquirió un gran prestigio, especialmente al ser aplicada en el campo de la astronomía. Fueron los años de la configuración del proyecto *Carte du Ciel*, iniciado en 1885. Se trata de un proyecto internacional en el que participaron numerosos observatorios, repartidos por todo el planeta, entre ellos, el de San Fernando, en Cádiz; y que tuvo como objetivo la creación de un Catálogo Astrográfico, fundamentado en los estudios astrométricos y fotométricos realizados a partir de miles de fotografías tomadas a lo largo de los años. La gran aportación del método fotográfico a estos estudios, fue el proporcionar a los científicos un registro permanente de las observaciones, y, como consecuencia de lo anterior, su facilidad para captar miles de estrellas en una simple placa, hecho que abrió la posibilidad de ser medidas y analizadas con detenimiento una vez impresa la copia. Esta es una cualidad del

método fotográfico que no se consigue con una simple observación con el telescopio o con un estudio fotométrico por medios fotoeléctricos, que necesariamente están circunscritos a un sólo cuerpo celeste. La *astrometría*, o ciencia de las mediciones de las posiciones y del movimiento de las estrellas, se vio ampliamente beneficiada por la incorporación de la fotografía a su instrumentación.

Y la fotometría también supo aprovechar las cualidades de la fotografía para sus fines, sobre todo a partir del estudio de la profundidad que presentaban los trazos y las huellas de las luces de los objetos estelares en las emulsiones. En ocasiones, el dato de interés no provino curiosamente de la imagen captada, sino del estudio del reverso de la placa. Este método, ideado por Edward Pickering en 1910, recomendaba que las fotografías fueran analizadas y medidas por el anverso, tras ser sometidas a calor o a luz. Este científico partió del supuesto de que las estrellas más luminosas tendrían un mayor impacto sobre la placa, y originarían una mayor densidad u opacidad en la misma, hecho que se traduciría en menos luz transmitida, susceptible de ser medida por el reverso de la placa; y viceversa. De esta forma pudo determinar el nivel de brillo de los cuerpos celestes. El procedimiento se perfeccionó posteriormente con la ayuda de termopilas y de galvanómetros medidores de la intensidad, y por medio de diafragmas capaces de aislar la estrella en cuestión. Aunque los procesos de automatización constantes que ha experimentado este tipo de técnica se han visto culminados en la actualidad con la llegada de los procedimientos digitales y de los ordenadores, el concepto que se mantiene es básicamente el mismo.

Durante gran parte del siglo XX, se produjo una convivencia muy estrecha entre los sistemas fotométricos de carácter fotográfico y los de índole fotoeléctrica. Estos últimos serán analizados en los capítulos correspondientes a las aplicaciones de la imagen tecnológica y en el dedicado a la fotoelectricidad (ver Cap. 2.8.2.; y 4.2.). Los sistemas de escaneado electrónico de fotografías por medio de haces de electrones producidos por tubos de rayos catódicos fue una instrumentación ampliamente utilizada en la fotometría estelar, dando lugar a numerosos catálogos de estrellas. Sin embargo, en líneas generales, los métodos fotoeléctricos se fueron imponiendo con el tiempo por su mayor sensibilidad y precisión a la hora de las mediciones, su mayor linealidad de respuesta, menor desviación de respuesta ante el color, una curva espectral más amplia con el uso de filtros, mayor capacidad para aumentar la sensibilidad, gracias a los fotomultiplicadores, y por su facilidad para ser integrados en sistemas informáticos de registro, análisis y almacenamiento. A todo lo anterior, hay que añadir, que las células fotoeléctricas, en su conjunto, no requieren de una comparación constante de la luz medida con una fuente estandarizada para su operatividad, un requisito ineludible por el resto de técnicas, y que redundaba en una mayor fiabilidad.

Dado que la fotometría está condicionada por la forma en que el ser humano percibe los objetos, y las luces y sus intensidades, y que esta dependencia ha originado numerosas imprecisiones y mal interpretaciones a lo largo de la historia impidiendo un desarrollo pleno de esta disciplina, existe una tendencia actual que pretende objetivizar al máximo su campo de acción, su terminología y sus conceptos básicos, a partir de establecer una diferenciación clara con respecto de la radiometría, o ciencia de la medición de radiaciones. Ya vimos en la introducción, cómo el lenguaje desempeña un papel muy importante a la hora de definir el amplio abanico de posibilidades que presenta la imagen tecnológica de nuestros días. Los términos brillo, luminancia, iluminancia, intensidad luminosa, flujo luminoso, etc., han sufrido cuantiosas revisiones en la literatura fotográfica a lo largo de los años, debido en parte al componente subjetivo presente en estas cuestiones y a la falta de un consenso en torno a una terminología básica que funcione a nivel



internacional, hecho que se ha agravado, en el caso particular del español, por las distintas traducciones. Una de las razones fundamentales para que se haya producido esta diferenciación de hoy día entre fotometría y radiometría viene dada, a mi entender, por el proceso de expansión que ha sufrido el conjunto de la instrumentación óptica, la fotográfica incluida, hacia mayores franjas del espectro electromagnético. El concepto de sonda del que hablábamos en capítulos anteriores es bien sintomático de lo que aquí se expone. La franja visible del espectro ha sido ampliada por cientos de instrumentos desarrollados mayormente en el último siglo, que han permitido la captación u observación de numerosos fenómenos hasta entonces invisibles por pertenecer a esas zonas ocultas del espectro. La luz visible es hoy una diminuta porción dentro del campo de estudio de la ciencia. El conjunto de radiaciones que van desde los rayos cósmicos a las señales de radio constituye hoy día una fuente inagotable para las incursiones científicas, y nos fuerza a establecer una clara diferenciación entre la instrumentación de observación y la de medida: entre aquella que está condicionada por la visión fotópica del ojo humano, y aquella que se rige mayormente por unidades físicas, representadas respectivamente por la fotometría y la radiometría.

### ***2.5.3. La luz eléctrica en la fotografía.***

Muy relacionado con el tema de la fotometría se encuentra el de la iluminación; de hecho, a medida que los instrumentos de medición de la luz fueron perfeccionándose, se vio la necesidad de fijar una serie de unidades lumínicas objetivas y de fácil utilización que substituyeran a la antigua definición de la *candela* que obedecía métodos muy rudimentarios. En sus orígenes, esta unidad de iluminación fue establecida en base a la luz desprendida por una vela fabricada con sebo de ballena, ajustada a unas medidas determinadas. Con el tiempo, y a medida que se fueron fabricando las primeras lámparas de aceite, queroseno, gas, etc., la *candela* fue definida en base a estos tipos de fuentes de luz menos variables<sup>96</sup>. Una de las primeras en entrar en la escena de los laboratorios fue una lámpara de aceite de colza que funcionaba con mecha. Fue utilizada ampliamente hacia 1800 por Dumas y Regnault en sus estudios fotométricos, pero presentó serios problemas de consistencia tan pronto como se comenzó a comparar los resultados obtenidos por distintos investigadores. En substitución de este tipo de lámpara, aparecieron las de keroseno y las de gas de carbón, que fueron desestimadas por razones parecidas. Así se llegó a 1877, fecha en la que se propuso utilizar la *lámpara de Harcourt*, que funcionaba con pentano, un hidrocarburo destilado del petróleo. Esta lámpara experimentó varias modificaciones a lo largo de los años, cambiando su valor energético de 1 a 10 candelas, hasta que se demostró que este valor dependía en gran medida de la presión barométrica y del índice de humedad en el ambiente. No obstante, fue una fuente de iluminación ampliamente utilizada en los laboratorios hasta bien entrado el siglo XX. De hecho, en 1916 todavía se publicaban los requisitos para su construcción y funcionamiento, tales como el tamaño exacto de la mecha, la distancia a la que debía ser colocado el dispositivo fotométrico, el método de preparación del pentano, etc. La utilización de combustibles como fuente de alimentación de las lámparas se extendió en la época al alcohol etílico, el éter etílico, el benzol y el acetileno. Pero fue otro tipo de hidrocarburo, el acetato amílico, el elegido para la fabricación de la *lámpara de Hefner*. Esta nueva lámpara tuvo una gran aceptación en el ámbito científico, especialmente en estudios fotométricos, ya que contaba con un dispositivo óptico con el que se podía ajustar la intensidad de la llama. Los requisitos para su construcción estaban también perfectamente especificados, desde el grosor, altura y número de hilachas que debía tener la mecha, a las proporciones que debía tener la vasija que contenía el

gas. Al presentar el inconveniente de que el tipo de llama que proporcionaba era muy ondulante y sensible a la sequedad del ambiente, compartió las mismas limitaciones que la de pentano en lo referente a humedad y presión atmosférica.

Todos estos inconvenientes hicieron pensar en la posibilidad de utilizar un estándar fotométrico más estable, como podía ser la radiación de un cuerpo sometido a determinada temperatura. En esta dirección, surgió la propuesta de Jules Violle, consistente en utilizar el punto de fundición del platino como punto de referencia, idea que fue aceptada como estándar en 1889. La candela quedó definida como la luz despedida por un centímetro cuadrado de platino fundido a la temperatura de solidificación. Con el tiempo se hicieron múltiples correcciones del punto de temperatura elegido, debido, entre otras razones, a las variaciones encontradas en el punto de fundición del platino, que suele estar sujeto a la presencia de sustancias contaminantes. Esta fue una de las razones por las que los científicos buscaron en las lámparas incandescentes un nuevo estándar de iluminación, idea que fue pronto desestimada por la dificultad de fabricar lámparas con la suficiente exactitud y similitud de fabricación entre ellas. Algo similar sucedió cuando se barajó la posibilidad de utilizar las descargas producidas en los gases de sodio y helio, depositados en el interior de los tubos de vacío, como posibles fuentes de luz que proporcionaran una unidad estándar de iluminación. Pero la definición más estable de la candela, como unidad internacional, no llegó hasta 1948, cuando fue definida por la CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*), como la intensidad lumínica proporcionada por la radiación de un cuerpo negro, a la temperatura de congelación del platino ( $2045^{\circ}\text{K}$ ), a través de una abertura de  $1/60\text{ cm}^2$ , sometida a una presión de 101,325 Newtons por metro cuadrado<sup>97</sup>. Sin embargo, nuevas modificaciones y precisiones se han producido sin cesar hasta nuestros días, hasta llegarse a incorporar una variable hasta entonces no muy tenida en cuenta para estos fines, que es la dirección del flujo de luz. Es importante señalar en este contexto que a medida que la ciencia comenzaba a buscar nuevas fórmulas de definición de las unidades estándar de iluminación, la fotometría también sufrió una reforma conceptual que afectó a sus planteamientos básicos, sobre todo al centrar su interés prioritario en el estudio de la iluminación y en la forma en la que queda distribuida a partir de las diversas fuentes de luz existentes. La energía total de la luz, hoy día medida en vatios (W), su frecuencia en hertzios (Hz), y su dirección en esterradianes (sr), interesa actualmente más que la intensidad lumínica de una determinada fuente en sí misma.

La iluminación artificial comenzó a utilizarse en fotografía prácticamente desde su invención, y su uso fue apremiante desde que se comprobó que los tiempos de exposición de los primeros materiales fotosensibles eran extremadamente largos. En 1839, nada más hacer acto de aparición el daguerrotipo, se comenzó a utilizar la *luz de cal Drummond* o *luz de calcio oxhídrico* (Drummond limelight) en fotomicrografía y para retratos, entre los que hay que destacar los de David Octavius Hill. Este tipo de luz se obtenía al calentarse un cilindro de cal mediante una proyección de un chorro de oxígeno e hidrógeno, lo que daba lugar a un resplandor blanco muy intenso. Fue inventada por Galsworthy Guernsey, pero tomó el nombre de Drummond por ser el ingeniero de artillería Thomas Drummond el primero en utilizarla públicamente como sistema de señales<sup>98</sup>. Al año siguiente, apareció la luz de arco, producida por la detonación de gas cloruro. Fue éste un fenómeno detectado por Seebeck en 1812, tras observar la fuerte luz actínica que los fuegos de Bengala producen al explotar, despidiendo restos de gas cloruro. Este tipo de iluminación fue utilizado en daguerrotipos por diferentes autores, y por Berres, en fotomicrografía. En este mismo año de 1840, se empezó también a utilizar la luz de arco eléctrico. Concretamente, se utilizó luz de arco de carbón producido por series de baterías galvánicas de noventa elementos. Cuatro años más tarde, aparecieron los trabajos de Fizeau y Foucault, en los que se comparaba el efecto producido por distintos tipos de iluminación, desde la solar, la eléctrica, la

de calcio, etc., a nivel óptico y en placas fotográficas, deduciendo que la iluminación química producida por luz Drummond era igual o menor que la producida por la luz de arco generada por cuarenta elementos galvánicos. En 1859, Roscoe y Bunsen continuaron este tipo de investigaciones, comparando esta vez la luz producida por la llama del monóxido de carbono y la del gas detonante cloruro. La luz de calcio Drummond tuvo gran aceptación para la realización de ampliaciones fotográficas y en proyecciones, hasta que fue desplazada por la de arco eléctrico. Hay que tener presente que las ampliaciones se venían haciendo hasta la fecha mediante grandes lentes condensadoras, de hasta un metro de diámetro, que recogían el máximo de luz solar posible. Estas cámaras solares estuvieron vigentes hasta la llegada de las placas de bromuro de plata a la gelatina en seco, unos veinte años más tarde. En 1857 apareció otra fuente de iluminación digna de mención, que obedecía al método denominado *Photogen* de John Moule. Esta consistía en producir una pequeña explosión con un compuesto pirotécnico, que se preparaba y activaba tras una mampara para proteger a los modelos.

El conjunto de todas estas fuentes de luz artificiales fue ampliamente utilizado en la producción de retratos, con la ayuda de reflectores parabólicos, espejos y tragaluces pintados de azul, elementos que ayudaban a disminuir los tiempos de exposición necesarios. El uso de cristales azules en las ventanas de los estudios, y de otros materiales como telas o biombos pintados de este color, se utilizaron para aumentar la sensibilidad de las emulsiones. La razón de la elección del azul obedecía a que el material fotográfico en sus orígenes era más sensible a esta franja del espectro, algo que dio a conocer el mismo E. Becquerel cuando formuló su teoría sobre los *rayos activadores* (azules) e *inhibidores* (rojos) y su efecto sobre las emulsiones. El retratista Disderi hizo gran uso de estas técnicas, adquiriendo notable fama con sus *retratos miniatura*, destinados a la edición de tarjetas de visita, muy populares en la época. Por el contrario, las lámparas de arco de carbón fueron profusamente utilizadas por fotógrafos y científicos del prestigio de Talbot, Foucault y Donné para hacer una de las primeras series de fotomicrografías de la historia; o por el celebrado Nadar, que las empleó en su estudio para hacer sus extraordinarios retratos y en una serie de reportajes que realizó entre 1861-1862 de las cloacas y las catacumbas de París.<sup>99</sup>

Mientras tanto, hacia 1859, comenzó a utilizarse la luz de filamento de magnesio, en competencia con la eléctrica de arco. Los mismos Bunsen y Roscoe estudiaron los efectos actínicos que se producen al quemar el magnesio, especialmente en la franja del ultravioleta; y fueron los primeros en ser retratados con esta nueva técnica por el fotógrafo Brothers, quien la utilizó también para fotografiar el interior de la minas. En estas fechas se propuso también la utilización del polvo de magnesio como una primera forma de luz de flash - aunque no empezó a ser comercializada hasta 1886-, con el inconveniente de provocar una gran cantidad de humo tras la explosión. Pronto fue desplazada por la lámpara eléctrica de flash, fabricada por Chaufour entre 1892 y 1893, sirviéndose de un filamento de magnesio que era colocado en el interior de una válvula de vidrio, al modo de los tubos de vacío y de las primeras lámparas incandescentes. Este primer tipo de lámpara de flash estuvo sujeto a frecuentes explosiones, por lo que su técnica tuvo que ser mejorada en los años sucesivos, hasta conseguirse la versión más definitiva de Ostermeier, que sustituyó el filamento de magnesio por uno de aluminio y lo insertó en una válvula de vacío con cierta cantidad de oxígeno. La luz de gas fue muy utilizada también en esta época, especialmente en los estudios fotográficos, donde era reforzada con reflectores.

Hacia 1866 la industria ya estaba preparada para materializar de una forma comercial y a gran escala el descubrimiento de la dinamo de Faraday. Fue Werner Siemens, y su próspera empresa dedicada mayormente a la ingeniería eléctrica y

a las telecomunicaciones, quien la puso en práctica. En pocos años, la generación de electricidad comenzó a afectar a todas las parcelas de la producción industrial y la vida cotidiana en las grandes ciudades. Proliferaron los motores eléctricos, que fueron aplicados en multitud de talleres y fábricas; los hornos eléctricos, decisivos en la producción de diferentes metales, como el acero; y la electricidad, como fuente de alimentación de los primeros tranvías, ascensores, ferrocarriles, metros, sistemas de regulación del tráfico, etc.,. Aunque la utilización de la luz eléctrica, generada por dinamos, comenzó hacia 1877, su entrada en los hogares y en los estudios de fotografía tuvo que esperar al menos hasta los primeros años del siglo XX. Un paso decisivo en este camino fue la invención en 1882 de la lámpara incandescente, de filamento de carbón, por Joseph Wilson Swan y Thomas Edison. Tres años antes, Edison había ideado una lámpara incandescente pero en un nivel experimental. Su filamento era un hilo de coser carbonizado, que pudo mantener al rojo vivo durante cuarenta horas. Para llevarse a cabo estos hallazgos, fue determinante el conocimiento que se tenía por entonces de la tecnología de producción de vacío aplicada a los primeros tubos electrónicos. Curiosamente, Swan se dedicaba desde hacía varios años a la fabricación de un papel fotográfico al bromuro de plata, especialmente preparado para ser utilizado con niveles mínimos de iluminación artificial<sup>100</sup>. Los antecedentes de este tipo de lámparas, que funcionan termoeléctricamente llevando el filamento a la incandescencia, se encuentran en los estudios que A. F. de Fourcroy llevó a cabo en 1800 sobre el efecto calorífico de la corriente eléctrica, hecho que constató llevando a la incandescencia un alambre mal conductor<sup>101</sup>. De este hallazgo surgieron posteriormente no sólo las lámparas incandescentes, sino también los amperímetros, voltímetros y vatímetros. Hacia 1808, Humphrey Davy, conocedor de este tipo de fenómenos, construyó un primer prototipo de lámpara de arco de carbón, tras constatar que pequeñas tiras de metal llevadas a la incandescencia emitían luz. También Walter De LaRue construyó en 1820 una lámpara con un filamento de platino, colocado dentro de una esfera de cristal. Posteriormente Joule dio a este fenómeno una formulación científica, comprobando que el efecto calorífico de la corriente galvánica es proporcional al producto de la resistencia por el cuadrado de la intensidad de la corriente.

Una vez consolidada la técnica de iluminación de flash por el procedimiento del magnesio en polvo, proliferaron los estudios sobre el fenómeno estroboscópico,



*Fig. 2.99. Lámpara de Torio-Acetileno para estudios microscópicos. 1927.*

entre los que hay que destacar los llevados a cabo por Ernst Mach entre 1881 y 1887. Sus primeros experimentos con proyectiles adquirieron bastante notoriedad. Al ser disparados, la onda expansiva del proyectil iba cortando a su paso una serie de cables colocados en el interior de un tubo de cristal, lo que hacía detonar los distintos flashes. Hacia 1899, Adolf Miethe y Gaedicke introdujeron notables mejoras en la técnica de flash, sustituyendo el polvo de magnesio por un filamento o una pasta del mismo material, ya que no presentaban peligro de explosión.

A partir de la entrada del nuevo siglo, la iluminación artificial utilizada en fotografía comenzó a ser casi exclusivamente de tipo eléctrico. Las lámparas de aceite, de gas o de hidrocarburos mantuvieron su presencia en el campo de la fotometría, de las proyecciones, de la fotomicrografía (Fig. 2.99) y allí donde los medios eléctricos no estaban lo suficientemente desarrollados. Por un lado, las lámparas



incandescentes acabaron por elegir el tungsteno como elemento fundamental para la fabricación de los filamentos, dado su mayor eficacia. En 1910, Langmuir mejoró la técnica de este tipo de lámparas, al comprobar que el filamento de tungsteno se hacía más resistente a la evaporización si se introducían en ellas determinados gases inertes, y no con el uso exclusivo del vacío. Las lámparas incandescentes fueron la fuente de iluminación más utilizada hasta la llegada de los tubos fluorescentes en la década de los treinta. En 1959 volvieron a aparecer con fuerza en el mercado al fabricarse las nuevas lámparas termoeléctricas, comúnmente conocidas como lámparas halógenas de cuarzo. La diferencia básica entre una y otra es que ésta última añade un elemento halógeno, normalmente yodo o bromo, a los gases argón y nitrógeno, habituales en el modelo clásico, consiguiendo de este modo mejores resultados.

Dentro de las fuentes de iluminación eléctrica desarrolladas a lo largo del siglo XX para la fotografía, se encuentra el grupo de lámparas que opera con la producción de un arco eléctrico en el interior del tubo de cristal. En la década de los treinta aparecieron las *lámparas fluorescentes* y las de *vapor de mercurio*, como principales representantes de este grupo. Con los años, las *lámparas de descarga por arco* englobaron a todas aquellas en las que el arco eléctrico es su dispositivo más característico. En unas, es el vapor de sodio el gas que está presente en su interior en mayores proporciones, lo que le da un tono anaranjado muy particular, propio del alumbrado público; en otras, es el vapor de mercurio, y en otras el xenón. Dependiendo de la presión a la que son sometidos estos gases en el interior de las ampollas, nacen otras subdivisiones. Todas ellas comparten la formación del arco voltaico, que es una de las formas más primitivas de producir luz por procedimientos eléctricos, toda vez que son enfrentados dos electrodos a los que se somete a una diferencia de potencial determinada. En un principio, este fenómeno se producía en los laboratorios al aire libre, pero con el tiempo se comprendió que al encerrar los electrodos en una ampolla de cristal al vacío o en una atmósfera determinada, el efecto era mucho mayor, más controlable y eficaz. Una de las primeras lámparas de arco fue la de *mercurio*, ideada por John Way hacia 1860, aunque su fabricación y comercialización comenzó a partir de 1901, a cargo del sello Cooper- Hewitt. Este tipo de lámpara sustituyó con el tiempo a las de arco de carbón, vigentes desde 1876. A lo largo del siglo XX, las lámparas experimentaron continuas mejoras; en unos casos, al hacer uso de vapor de mercurio a alta presión; en otras, con la utilización de cristales de cuarzo sintético, o produciendo el arco eléctrico en una ampolla de reducido tamaño, emplazada a su vez en el interior de la lámpara. Este tipo de lámparas se impondría con el tiempo de forma generalizada en los estudios cinematográficos y de televisión, en estadios, teatros y grandes escenarios.

En la década de los veinte, las investigaciones condujeron a la fabricación de los tubos fluorescentes, una de las lámparas de descarga por arco más utilizadas a lo largo del siglo. El proceso de creación de este tipo de lámpara se inició cuando varios laboratorios observaron que el vapor de mercurio a baja presión, mezclado con determinados gases inertes, producía luz de una gran eficiencia. El único inconveniente que presentó esta técnica fue que emitía luz de una sola línea espectral cercana al ultravioleta, con lo que los semblantes de las personas aparecían cadavéricos. Para corregir esta deficiencia, se recubrieron las paredes internas del tubo con una sustancia fosforescente que, en combinación con la luz ultravioleta, producía luz visible más cálida. Hacia 1938 salieron al mercado los primeros tubos fluorescentes de distintas tonalidades. Una variedad de este tipo de fuente es el tubo luminiscente, popularmente conocido como *neón*, por ser éste el gas más utilizado y característico de su luz roja. Igualmente, encontramos aquí que el efecto luminoso se produce por la descarga producida en un tubo que contiene un determinado gas a cierta presión atmosférica. La combinación de estos gases es la que proporciona los diferentes colores.

Otras lámparas de arco dignas de mención son las de arco corto, más conocidas como *lámparas de xenon*, por ser este gas, junto al mercurio, el compuesto más utilizado. Se caracteriza por su tonalidad azul, proporcionar una gran luminancia, sólo superada por los láseres, y por generar una luz comparable a la luz de día. Se ha utilizado en gran medida en la industria cinematográfica, hasta la llegada de las lámparas de alta intensidad o de alta presión, tanto de sodio como de mercurio, o de las de metal haluro. Por último, dentro de este repaso general de las lámparas eléctricas utilizadas en el campo de la imagen, hay que destacar las lámparas de flash de efecto estroboscópico, como continuadoras de las lámparas de magnesio mencionadas en páginas anteriores. Como sus antecesoras, son utilizadas normalmente para fotografiar objetos en movimientos muy rápidos, con el fin primero de evitar el efecto borroso o de barrido. Este tipo de iluminación ha potenciado en la actualidad el desarrollo de la tecnología de pulsos, en la que la luz láser desempeña un papel de primer orden conjuntamente con los dispositivos electrónicos. El descubrimiento de la luz láser a mediados de los cincuenta abrió nuevas puertas al desarrollo científico. Esta luz monocromática perteneciente a la franja roja del espectro visible, es aplicada hoy día en multitud de áreas tecnológicas y constituye una de las herramientas más potentes en numerosos campos de la investigación científica. Sus aplicaciones más sobresalientes en el ámbito de la imagen afectan al campo de la fotometría, en el que opera como un instrumento de alta precisión para la detección y medida de los cambios que se producen en las cantidades de luz reflejada y transmitida en el momento de ser detectados por un sensor determinado. En este contexto, hay que destacar también su precisión para detectar las propiedades geométricas de las superficies, o de los tamaños de los objetos<sup>102</sup>.

La iluminación artificial por medios eléctricos ha prestado un servicio inestimable a las técnicas fotográficas y a la ciencia en general. Las técnicas anteriormente reseñadas se corresponden principalmente con aquellas que producen luz perteneciente al espectro visible, o región conocida como fotópica, en la que el sistema visual humano es el factor determinante. Pero la ciencia se ha beneficiado más aún, si cabe, de otras fuentes de iluminación que desvelan fenómenos que se producen más allá de este espectro. En este sentido, la luz ultravioleta, la infrarroja, o los rayos x, han supuesto un gran avance para la ciencia.

## Notas del capítulo 2.

- 1 De Tales a Demócrito. Fragmentos Presocráticos. Ed: Bernabé, Alberto. Círculo de Lectores, 1995. p 35.
- 2 Sobre el agua como principio: Aristóteles, Metafísica 983 b6 (A12); Plutarco, De Isis a Osiris. 34 (A11) Heráclito Homérico, Cuestiones homéricas. 22. La tierra flota sobre el agua: Aristóteles, Sobre el cielo 294 a 28 (A14); Séneca, Cuestiones naturales. 3. 14 (A15).
- 3 Westfall, Richard, S. Isaac Newton: una vida. Ed: Folio 2004. p 40. [Título original: The Life of Isaac Newton. Cambridge Univ. Press. 1996].
- 4 Op. cit. Cuevas. p 13 y ss.
- 5 Homero, La Iliada. (14. 200- 201) (14. 224)
- 6 Aristóteles. Acerca del alma. Gredos 1978, p 141.
- 7 Platón en Leyes. 10, 899B, menciona, sin nombrar a su autor, la creencia atribuida a Tales. *“Hay alguien que aceptará esto y mantendrá que todas las cosas no están llenas de dioses”*. Recogido en The Presocratic Philosophers. G. S. Kirk y J. E. Raven. Cambridge University Press, 1962.
- 8 Op. cit. Acerca del alma. 411 a17 (A22).
- 9 Broglie, Louis. Continuidad e individualidad en la física moderna. En Materia y luz. Espasa Calpe. 1939. p 226 y ss.
- 10 Marx, Karl. Diferencia de la filosofía de la naturaleza en Demócrito y en Epicuro. Ayuso, 1971. p 22.
- 11 Epicuro. Carta a Herodoto. [40], En Epicuro, Obras. Altaya 1998. p 10.
- 12 La cábala presenta una doble acepción: la interpretación de las sagradas escrituras por los judíos, o la adivinación supersticiosa de un hecho.
- 13 Gubern, Román. Patologías de la imagen. Anagrama 2004. p 24.
- 14 Galison, Peter. Images scatter into data, data gather into images. p 302. En Iconoclasm, Beyond the Image Wars in Science, Religion and Art. Edited by Bruno Latour y Peter Weibel. ZKM, 2002. (Traducción propia) *In the sciences of the last century and a half, the pictorial and the logical have stood unstably perched, each forever suspended over the abyss of the other.*
- 15 Ifrah, George. Historia universal de las cifras. Espasa Calpe 1997. p 783- 4. Título original: Histoire universelle des chiffres. Editions Robert Laffont, 1994.
- 16 Op. cit. Ifrah. p 1377.
- 17 Ibid. p 784.
- 18 Ibid. p 828
- 19 Op. cit. Ifrah, p 948.
- 20 Ibid, p 988.
- 21 Cita de Descartes recogida en Boll, Marcel. Qué es la energía. Pleamar, 1944. p 19.
- 22 Arte abreviado de encontrar verdad (Art abreujada d'atrobat veritat) Diecisiete volúmenes. Según Martin Gardner, en Logic, Machines, Diagrams and Boolean Algebra, Dover Ed. 1968. p 1. su título es Ars Magna y consta de más de cuarenta volúmenes.
- 23 Op. cit. Ifrah. p 1460.
- 24 Hobson, J. P. The Future of Vacuum Technology. J. Vac. Sci. Tech. A 2(2),

- 144- 49. 1984. O en términos de termodinámica, el grado de vacío o grado de compresión viene dado por el recorrido medio libre de una molécula en un gas, o distancia que una molécula recorrería hasta colisionar con otra o con la superficie del recipiente que lo contiene.
- 25 Madey, Theodore E. Early applications of vacuum, from Aristotle to Langmuir. J. Vac. Sci. Tech. A 2(2), 110-117. 1984.
- 26 Hablanian, M. H. Comments on the history of vacuum pumps. J. Vac. Sci. Tech. A 2(2), 118-25. 1984.
- 27 Fue el propio Huygens quien se deleitaba haciendo exhibición del comportamiento de caída de una moneda y de una pluma en el interior de un recipiente al vacío, demostrando cómo la ausencia de aire hacía caer los cuerpos a la misma velocidad.
- 28 Gehrenbeck. Richard K. Electron Diffraction: fifty years ago. Phys. Today 31 (1), 34- 41. 1978.
- 29 Hacia finales de la década de los sesenta, los laboratorios eran capaces de generar vacío de 10-11 torr. equiparables a los que se producen en la atmósfera a 1.200 millas de altitud. En el espacio interplanetario se producen presiones del orden de 10-16 torr. En estas condiciones los procesos químicos, los materiales, etc., se comportan de una manera muy peculiar, de aquí la necesidad de generar en los laboratorios condiciones lo más parecidas posibles, a fin de estudiar y prever los resultados. Ibid. p 8.
- 30 Op. cit. Hobson.
- 31 Needham, Joseph. La ciencia y la influencia china en el mundo. En "El legado de China", colección de artículos dirigida por Raymond Dawson. Pegaso, 1964. p 405. Wang Chung en su libro Lun Heng (Discursos pesados en la balanza)
- 32 Op. cit. Eder. p 57.
- 33 Cf. Gibson, Charles R. The History of Photography, en Photography as Scientific Implement. A Collective Work. Blackie and Son Limited, 1923. pp 10-11
- 34 Op. cit. Eder. p 57 y ss.
- 35 Cf. Meldola, Raphael. The Photographic Image. Nature, July 10, 1890. p 247
- 36 Hay quienes prefieren otorgar la autoría de este hallazgo a Carlisle y Nicholson, en 1800, como hace James Jeans, en su Historia de la física. Fondo de Cultura económica 1953. p 325. Título original: The Growth of Physical Science. The Macmillan Company.
- 37 Op. cit. Jeans. Historia de... p 330- 1.
- 38 Weinberg, Steven. The Discovery of Subatomic Particles. Cambridge Univ. Press. 2003. p 34. (Traducción propia)
- 39 Ibid. p 34.
- 40 Op. cit. De Broglie. Por los senderos de la ciencia. p 149.
- 41 Citado por Ivins jr, W. M. Imagen impresa y conocimiento. Análisis de la imagen prefotográfica. Gustavo Gili, 1975. p 27. Título original. Prints and Visual Communication. Roudledge & Kegan Paul, Ltd
- 42 Ibid. p 219.
- 43 Martínez- Val Juan. Historias y Tecnologías del Arte de Imprimir. Ed: [www.juanval.net/iber2/historia\\_index.htm](http://www.juanval.net/iber2/historia_index.htm). 2005. La escritura y el libro en la antigüedad: 2 / 2.
- 44 Citado por Mimi Cazort, en Op. cit. Beauty of another..., p 14.
- 45 Op. cit. Martínez- Val. La difusión de la imprenta. Del facistol al libro de bolsillo: 2 / 4.



46 Este mismo año, como ya adelantamos en páginas anteriores, John Strather presentó la primera patente del procedimiento offset, una variedad del método litográfico, que tendría que esperar unos años más para convertirse en una de las técnicas de artes gráficas más extendidas y afamadas en el mundo.

47 Op. cit. Ivins. p 175.

48 Para una mayor profundización en el estudio de esta materia se recomienda la lectura de Etching, Engraving and Photography: History of Photomechanical Reproduction, y Photography and Photogravure: History of Photomechanical Reproduction, ambos artículos de Eugene Ostroff, publicados en el Journal of Photographic Sciences, Vol. 17, 1969, pp 65- 80, y pp 101- 115, respectivamente.

49 Op. cit Eder, History of... p 195. Cabe la posibilidad de que la primera fotografía la hiciera Niepce en 1822 cuando reprodujo por medios fotográficos un grabado en cobre del Papa Pío VII, del que no se conserva copia.

50 Op. cit. Ostroff.

51 Eder, Josef Maria. La Photographie Instantanée, son application aux arts et aux sciences. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888. p 128 y ss.

52 Op. cit. Ostroff, p 78.

53 Op. cit. Ostroff. p 108.

54 En el capítulo dedicado a la imagen fotográfica no convencional (ver Caps. 5.2.2, y 5.4.), se hace un repaso de las técnicas de producción de imágenes que no utilizan las sales de plata, muchas de ellas destinadas a fines reprográficos y muy próximas al campo de las artes gráficas, lo que sirve para completar la información proporcionada en este apartado.

55 Si el conjunto de las impresoras de hoy día tiene su antecedente más directo en la máquina de escribir, los plotters lo tienen en el pantógrafo. De cualquier modo, impresoras y plotters están confluyendo en la actualidad en un mismo concepto y tecnología, en cuanto sus aplicaciones son cada vez menos diferenciables.

56 Yurcik, William J. Printing Devices.

<http://www.bookrags.com/sciences/computerscience/printing-devices-csci-02.html>. 2005. p 1

57 Op. cit. Focal... p 1098.

58 Op. cit. Martínez- Val.

59 Aquí, en cambio, estaría presente la cuarta dimensión, relativa al tiempo.

60 Bert Hickman. What are Lichtenberg Figures and How are they created?. [www.teslamania.delete.org](http://www.teslamania.delete.org) . 1995- 2005.

61 Lee, Everett. S, y Foust, C. M. Measurement of Surge Voltages on Transmission Lines Due to Lightning. General Electric Review. Vol. 30. No. 3. Marzo de 1927. p 135- 45.

62 Trouvelet, E. T. Sur la forme de décharges électriques sur les plaques photographiques. La Lumière Électrique, 1888, v 30. p 269- 72.

Brown J. On figures produced by Electric Action on Photographic Dry Plates. Phil. Mag. 1888. serie 5, vol. 26, pp 502- 505..

63 Op. cit. Eder. History of... p 260 y 261.

64 Del semáforo al satélite. Compilación de la UIT, 1965.

65 Marey E. J. A Study on Locomotion. Nature, 13 de marzo de 1879. p 438 y ss.

66 Tubbs, M. R. 1976 Electrophotography Conference. The Journal of Photography Science, Vol 25, 1977. p 127.

- 67 Focal Encyclopedia of Photography. MacGraw Hill. Focal Press Ltd., 1969. p 503.
- 68 Electrophotographic Processes and Systems, Donald R. Lehmbeck, en Op. cit. Neblette's Handbook, p 333.
- 69 Murray, Richard D. Silverless Imaging Systems. En Neblette's Handbook of Photography and Reprography. Materials, Processes and Systems. Ed. John M. Sturge. Van Nostrand Reinhold Company, 1977. p 402.
- 70 Op. cit. Del semáforo... p 26-7.
- 71 Op. cit. Zischka. p 220.
- 72 Lavenir, Catherine B. Great Discoveries. Telecommunications. UIT, 1991. p 11.
- 73 Menéndez- Pidal, Gonzalo. La España del siglo XIX, vista por sus contemporáneos. Ed. Centro de Estudio Constitucionales. 1988. Tomo I. p 288.
- 74 Op. cit. Zworykin. Photoelectricity. p 350.
- 75 Thorne Baker. T. Recent work in the Telegraphic Transmission of Pictures. Nature, 13 de Enero de 1910. p 309.
- 76 Op. cit. Zischka. p 222- 3.
- 77 Flichy, Patrice. Una historia de la comunicación moderna. espacio público y vida privada. Gustavo Gili, 1993. p 119. Une histoire de la communication moderne. Espace public et vie privée. Editions La Decouverte, París, 1991
- 78 Gonzalez, Rafael C y Wintz, Paul. Digital Image Processing. Addison- Wesley Publishing Company 1987. p 1 y 2.
- 79 Koehler, R. Les Applications de la photographie aux sciences naturelles. París. Gauthier Villars et fils. G. Masson, 1982. p 176 y ss.
- 80 Ibid, p 190.
- 81 Benjamin, Walter. Pequeña historia de la fotografía. Taurus, 1990.
- 82 Eder, Josep- Maria. La Photographie Instantanée: son application aux arts et aux sciences. 1888. p 26 y 27.
- 83 Op. cit. Burke. p 484- 5.
- 84 Ibid. p 485. (Traducción propia)
- 85 Una variedad de este tipo de obturador es el operado mediante una célula Kerr, que cambia la refringencia de un medio líquido o de un cristal situado en el mismo sistema óptico, impidiendo o permitiendo el paso de la luz.
- 86 Walsh, John W. T. Photometry. Dover Publications, 1953. p 1.
- 87 Op. cit. Eder. History of... p 112
- 88 Ibid. p 165.
- 89 Ibid. p 174.
- 90 Sheppard, S. E. The Theory of Photographic Processes and Methods. En Photography as Scientific Instrument. A Collective Work. Blackie and Son Limited, 1923. p 185.
- 91 Zischka, Anton. La epopeya de la electricidad. De la pila de Volta al ciclotrón. Círculo de lectores, 1967. Título original: Pioniere der Elektrizität. C. Bertelsman Verlag, 1958. p 194- 5.
- 92 Op. cit. Zworykin- Ramberg. Photo- Electricity. p 3 y 4.
- 93 Allen, H. S. The Early History of Photo- Electric and Selenium Cells. en Photo- Electric Cells and their Applications. Anderson, John, S. Editor. The Physical and Optical Societies, 1930. p 6.
- 94 Las células fotoconductoras de selenio, nacidas de las múltiples investigaciones con este material, no han gozado de una gran aplicación.

Paradójicamente, el selenio ha sido más aplicado en las células fotovoltaicas y las células fotoconductoras han preferido utilizar el sulfuro de talio o el sulfuro de plomo en substitución del selenio.

95 Galadí- Enríquez, D, y Ribas, I. Manual práctico de Astronomía CCD. Ediciones Omega, 1998. p 12.

96 Op. cit. Walsh. p 5.

97 Op. cit. burke. p 45.

98 Op. cit. Eder. History... p 528.

99 Op.cit. Focal Encyclopedia of... p 880.

100 Op. cit. Eder. History... p 440.

101 Anteriormente, en 1710, Francis Hauksbee había conseguido provocar un destello luminoso en el interior de una vasija de cristal en la que había introducido mercurio.

102 Op. cit. Burke. p 254.





## Capítulo 3. La fotografía en la formación de la ciencia electrónica. 1850- 1920.

### 3.1. La fotografía y el fin del determinismo en ciencia.

*Toda síntesis, toda teoría, como todo ser  
viviente, posee una fuerza interior de expansión.<sup>1</sup>*

**Paul Lagevin**

El siglo XIX es un siglo eminentemente de revoluciones, no sólo en lo político y social, sino en el ámbito de la cultura, tanto científica como artística, y de la tecnología. El germen de las grandes transformaciones que experimenta la humanidad en la dos primeras décadas del siglo siguiente, materializadas en las comunicaciones interplanetarias, en las revoluciones proletarias, en el surgimiento de las vanguardias artísticas, o en la formulación del modelo cuántico- relativista, se encuentra en este siglo que vio nacer el telégrafo eléctrico, el materialismo histórico, la fotografía y el indeterminismo en ciencia. En este sentido, la mecánica newtoniana, vigente durante más de dos siglos, fue paulatinamente acomodándose a las exigencias de los nuevos descubrimientos y de la aparición de dos nuevas ciencias fundamentales: la termodinámica y el electromagnetismo. La mecánica clásica ha acabado en nuestros días por convertirse en una parcela de la ciencia, dedicada mayormente a los procesos macroscópicos, donde sus leyes generales, fijas y precisas, siguen aplicándose de forma invariable y con continuado éxito. Fue el siglo XIX, con el surgimiento de la termodinámica y el electromagnetismo, el que puso serias limitaciones a sus fundamentos, considerados hasta entonces de aplicación universal. La termodinámica forzó a admitir el principio de contingencia o de probabilidad a una ciencia acostumbrada a regirse por unos principios inamovibles y generales que venían aplicándose a cualquier sistema de fuerzas, desde una polea al movimiento rotatorio de los planetas. De otro lado, fue el electromagnetismo el encargado de revisar sus concepciones generales sobre el espacio y el tiempo, tan pronto como comenzó a escudriñar en los fenómenos diminutos que se producen a escala atómica, y una vez que el concepto de *fuerza a distancia* comenzó a adquirir un papel ineludible. La fotografía apareció en este tumultuoso escenario como un instrumento de observación de una potencia desconocida hasta entonces, y su presencia comenzó a sentirse a medida que avanzaron los años. En un principio, asistió a estas transformaciones como convidado de piedra, en espera de que sus procedimientos y técnicas se hicieran más refinados; pero hacia finales de siglo, su presencia fue implacable, al presentar pruebas irrefutables y fundamentales para los nuevos modelos de interpretación de la naturaleza. Basta recordar que las teorías sobre el calor de Fourier y de Sadi- Carnot se formularon a principios de siglo, coincidiendo con las primeras heliografías de Niépce, o primeras fotografías de la historia; o que el desarrollo de la termodinámica y del electromagnetismo, corrió paralelo al de la propia fotografía. Curiosamente, fue la posibilidad de

observación de los fenómenos, piedra angular sobre la que se edifica el método científico experimental y que afecta a la esencia de la fotografía, el elemento que más afectó al desarrollo de estas ramas de la ciencia. Para finales de siglo, las tres conquistaron la mayoría de edad.

Volviendo a la termodinámica, lo inobservable, unido a la contingencia de los fenómenos producidos por el calor fueron elementos que esta nueva ciencia se vio forzada a otorgar un papel de primer orden. Esto supuso un paso trasgresor en la ciencia edificada hasta entonces.

*Lo que en realidad parece ser objeto de dudas, es la aplicación, a los movimientos invisibles, de las leyes de la mecánica establecidas para los movimientos visibles y que, aun para éstos, no representan más que una primera aproximación, por otra parte excelente.<sup>2</sup>*

Fueron las máquinas de vapor, ampliamente utilizadas a lo largo del siglo XVIII, las que hicieron pensar a los científicos sobre los fenómenos inobservables que tienen lugar en su interior, y en las posibles correlaciones que podían existir entre la fuerza generada por sus pistones y el calor producido en ellas. Los fenómenos eléctricos también presentaron numerosas incógnitas, pues sólo podían ser explicados a partir de sus manifestaciones más obvias, quedando en secreto sus verdaderas causas. Minas, talleres, destilerías, fábricas, en las que el vapor fue la fuente de energía más utilizada, y las múltiples manifestaciones de lo eléctrico, fueron realidades que no pudieron pasar inadvertidas a la ciencia del momento. De igual manera, las transformaciones que se produjeron en el paisaje urbano de los países más industrializados tuvieron que ser atendidas por las nuevas filosofías de corte materialista, como el positivismo o el marxismo.

La interpretación dada a los flujos del calor por Jean Baptiste Joseph Fourier en 1822, constituyó un primer paso en este proceso de liberación de la ciencia, a la vez que marcó el origen de una de las herramientas matemáticas de mayor trascendencia en el campo científico y tecnológico. Desde entonces, cualquier señal que analicemos, por muy compleja que sea, o pertenezca a un fenómeno calorífico, eléctrico o sonoro, puede ser reducida a una onda simple de variación constante. La suma de curvas sinusoidales de distintas frecuencias puede representar, con la precisión que se quiera, cualquier forma de curva o forma de onda<sup>3</sup>. Si la señal es de variación periódica, se le aplica la *serie de Fourier*, si por el contrario, no se repite en el tiempo, se le aplica su *transformada o integral*. Esta herramienta matemática es de aplicación constante en numerosas ramas de la ciencia y la tecnología, especialmente donde los fenómenos estudiados son comprendidos como señales en forma de onda. El caso concreto de las telecomunicaciones es tal vez el más representativo hoy día, si bien las series de Fourier desempeñan un papel de primer orden en la actual producción de imágenes sintéticas, siempre que los medios ópticos convencionales no llegan, por sí solos, a ofrecer una representación completa de los fenómenos observados. La reconstrucción de las fases que forman las ondas luminosas y que no son debidamente registradas por los instrumentos de observación, se lleva a cabo mediante esta instrumentación matemática. Destaca en este contexto la *espectroscopía por difracción de rayos X*, fundamental en biología molecular y cristalografía.

Sadi Carnot fue el primero en estudiar las relaciones existentes entre el trabajo y el calor, pero sus escritos pasaron desapercibidos hasta finales de siglo, cuando fueron reivindicados por William Thomson. El primer principio de la termodinámica, o principio de la conservación de la energía, se debe a él; si bien fueron Mayer y

Joule, los que dieron una formulación más estricta de esta interdependencia. Joule fue un buen aficionado a la fotografía, y su infancia, vivida junto a las nuevas destilerías de cerveza de Salford, su ciudad natal, influyó decisivamente en sus teorías<sup>4</sup>. El concepto de trabajo y fuerza, en este siglo, cobró un significado que trascendió lo puramente teórico, pues fue ligado irremediabilmente a algo tan concreto y tangible como fueron los procesos de producción industrial imperantes, y a un valor específico determinado por la rentabilidad económica que facilitaban<sup>5</sup>. Lavoisier había estudiado anteriormente el calor como un fenómeno ocasionado por los procesos de combustión relativo a los esfuerzos humanos, y lo cuantificó en base a la oxidación de la sangre, tal como se manifiesta en el color sonrojado que adquieren los capilares de la piel, en relación con la temperatura ambiente<sup>6</sup>. Las teorías de Mayer y de Joule vinieron a delimitar los valores del calor en base a parámetros más pragmáticos, a resultados de la observación de las máquinas de vapor, y de las necesidades de la industria del momento. En 1844, Joule relacionó calor, electrolisis y reacciones químicas, haciendo mediciones paralelas y formulando la naturaleza atómica, común a todos esos fenómenos. Estudió también el calor producido por las dinamos y la compresión de los gases a partir de su similitud con el paso del agua a través de conductos estrechos. Cuatro años más tarde, ofreció una definición precisa del valor mecánico del calor y de la teoría cinética de los gases. La presión ejercida por éstos contra las paredes de los recipientes que los albergan se interpretó en base al movimiento de las partículas constituyentes. Al relacionar estos dos campos, determinó la velocidad media de las partículas en el interior de un gas, a partir de la temperatura y la presión existentes, y de los pesos específicos de las partículas. Un grado mayor de abstracción en esta dirección vino con la formulación del primer principio de la termodinámica, que en la actualidad es atribuido a un gran número de investigadores, entre ellos, Joule, Mayer, Lomonosoff, etc., lo que nos da a entender que este principio general de la conservación de la energía, pululaba con intensidad en el ambiente de los laboratorios del momento. La ciencia no se demoró en buscar una mayor trascendencia a esta ley de conservación de la energía, al inferir que la energía del universo es constante.

A un mismo tiempo, la ciencia de la electricidad dio pasos agigantados. En 1830, Faraday enunció las leyes de la *inducción electromagnética* y el concepto de línea de fuerza para lograr una interpretación de las acciones mutuas entre los fenómenos de la electricidad y el magnetismo. Ya he indicado en capítulos anteriores las posibles conexiones existentes entre la formulación de esta teoría o imagen física fundamental en la ciencia, y la importancia que dio este físico a las imágenes reales, en disposición geométrica, que las limaduras de hierro forman en el papel por la acción magnética. Coincidentemente, el calor fue estudiado en relación con los fenómenos eléctricos, dada la cantidad de interconexiones observadas. La teoría atómica, muy en boga por entonces entre los científicos a partir de las propuestas de Dalton, proporcionó interpretaciones muy fecundas al respecto. El hecho de que los fenómenos internos producidos, tanto en el ámbito de la electricidad como del calor, no sean directamente observables, y que sólo lo sean sus efectos, ayudó a este resurgimiento de las tesis atomistas que entendían estos fenómenos como la acción de partículas diminutas en movimiento.

La formulación más estricta y matemática de la teoría del calor recayó en las manos de Rudolf E. Clausius y William Thomson, quienes de forma independiente, enunciaron la segunda ley de la termodinámica relativa a la *entropía* o principio de la degradación de la energía. En esta ocasión, las inferencias de tipo generalista no se hicieron esperar, al afirmarse que la entropía del universo tendía asimismo al máximo. Con los trabajos de Clausius y Thomson se estableció más firmemente la equivalencia de trabajo y calor, así como los primeros principios de la mecánica estadística, una vez que se defendió la estructura atómica de la materia y se interpretaron los efectos del calor como la distribución estadística de los sucesos

atómicos. La mecánica clásica se vio trascendida por esta nueva mecánica de carácter estadístico. Tal como señaló Norbert Wiener en su día: “*la dinámica de Newton y la termodinámica pasaron a ser en realidad una misma ciencia, separadas tan sólo por la aplicación o no de la estadística*”<sup>7</sup>.

A un mismo tiempo, el electromagnetismo consiguió cotas extraordinarias con los trabajos de Faraday y Maxwell. El primero publicó en 1851 una de sus obras capitales: *On lines of Magnetic Force: their definite character, and their distribution within a Magnet and through space*, donde expuso la teoría que relaciona la corriente inducida y la fuerza magnética, en contra del pensamiento matemático de la época. A los cuatro años, los trabajos de Faraday recibieron el espaldarazo de *Faraday's Lines of Force*, obra de Maxwell en la que defendía de forma rigurosa y matemática las ideas de su compatriota. Estas dos obras pretendieron establecer una concepción mecánica de los fenómenos electromagnéticos, a semejanza de la existente sobre el movimiento de los fluidos viscosos o la de elasticidad de los sólidos. El conjunto de interpretaciones de los fenómenos eléctricos, se vio culminado con la publicación en 1865, de la ya comentada *Treatise on Electricity and Magnetism*, una obra cumbre de la historia de la ciencia, en la que quedan ejemplarmente unidas óptica y electricidad. Años más tarde, el físico Andrade reafirmaba la importancia de esta hazaña.

*Difícilmente podemos evitar la inferencia de que la luz consiste en ondulaciones transversales del mismo medio en el que se producen los fenómenos eléctricos y magnéticos.*<sup>8</sup>

El medio de propagación de esas ondas, denominado entonces éter, tan inobservable como el movimiento de las partículas de los gases, supuso un motivo de reflexión, de revisión y de desacuerdos constantes en los años venideros. La propagación de las ondas electromagnéticas precisó de ese espacio ideal, presentado para complacer los requisitos impuestos por el modelo interpretativo de la mecánica clásica. No pasaron muchos años para que nuevas experimentaciones y observaciones contradijeran la existencia de dicho elemento, abriendo una crisis sin precedentes en el seno de la ciencia, de donde surgió victoriosa la nueva concepción relativista del espacio y el tiempo.

*Empero había nacido una gran esperanza como resultado de la obra de Maxwell, que demostraba la analogía profunda entre las ecuaciones del electromagnetismo y las de la mecánica; pero ello justifica igualmente la tendencia opuesta - que hoy parece infinitamente más fecunda- de hacer descender la mecánica al plano de las consecuencias y reservar el primer lugar al electromagnetismo junto a la atomística.*<sup>9</sup>

El atomismo no cesó de cobrar nuevas fuerzas. Los científicos prefirieron explicar los fenómenos propios de la termodinámica y el electromagnetismo con este modelo que defiende la existencia de un universo formado por partículas. Es cierto que éstas eran inaccesibles a los instrumentos de medición y observación de la época, pero proporcionaron un sentido real a lo que podía ser observado. En este sentido, no se alejaron del modo de actuación de Demócrito, Leucipo o Epicuro.

Un paso decisivo en esta trayectoria, se produjo cuando los principios generales de la termodinámica comenzaron a aplicarse al campo de las radiaciones,



especialmente con los trabajos teóricos de Ludwig Boltzmann y de J. W. Gibbs. El primero ofreció en 1884 una explicación, en términos de termodinámica, de la energía total de la radiación de un *cuerpo negro*, como proporcional a la temperatura absoluta. El concepto de cuerpo negro de Kirchhoff, como idealización de un cuerpo capaz de absorber y emitir el máximo de radiación, y el de temperatura, entendida en una escala absoluta, se mostraron muy fructíferos en unos años en los que la ciencia comenzaba indefectiblemente a cambiar de rumbo. Tan pronto como W. Wien encontró una fórmula para la distribución de la energía en el espectro de la radiación de un cuerpo negro, como continuación del camino iniciado por Boltzmann, se abrieron las puertas a la física moderna, tal como fue concebida por Max Planck<sup>10</sup>. Los trabajos eminentemente experimentales de autores como O. Lummer y E. Pringsheim en estos años sobre el estudio espectrográfico de la distribución de la energía emitida por diferentes sustancias y cuerpos sometidos a diferentes temperaturas, fue de una importancia decisiva para la formulación de estas nuevas teorías físicas que convulsionaron la ciencia de principios del siglo XX. Las fotografías de los espectros, muy abundantes en los laboratorios de entonces, desempeñaron con toda seguridad un papel crucial en estos avances.

*Efectivamente, las nuevas investigaciones en el dominio de la radiación térmica, para referirme a las cuales me contentaré con citar los nombres de W. Wien, F. Paschen, O. Lummer y E. Pringsheim, H. Rubens y F. Kurlbaum, han puesto de manifiesto, con una claridad cada vez mayor, que así como el primer principio de la Termodinámica constituye tan solo un aspecto del principio universal de conservación de la energía, así también el segundo principio, el del aumento de la entropía, no posee una significación independiente, sino que sólo se deja comprender en todo su contenido cuando se busca su esencia en los conocidos postulados del cálculo de probabilidades, de acuerdo con el punto de vista iniciado por Clausius y Maxwell y desarrollados sobre todo por Boltzmann. En su virtud, la entropía de un estado natural cualquiera es igual, de un modo completamente general, al logaritmo de la "probabilidad" de dicho estado multiplicado por una constante universal cuyas dimensiones son las de una energía dividida por una temperatura.<sup>11</sup>*

La incorporación del concepto de probabilidad a la física teórica fue muy fructífera. La entropía, de ser enunciada por la mecánica estadística como el estado de máxima probabilidad que un sistema puede adquirir, o como el estado de máximo desorden que presentan sus partículas, fue trasladada sin demora a otras lindes más especulativas como la formulación del caos, o de la propia muerte de los sistemas. El mismo universo seguiría un proceso irremisible de disipación de su energía, si no fuera porque pronto se defendió la existencia de un efecto contrario, denominado *nequentropía*<sup>12</sup>, responsable de la revitalización constante del sistema, o al menos de una paralización temporal del proceso de desorden.

Tal como señala De Broglie<sup>13</sup>, de acuerdo con el pensamiento de Planck, la termodinámica sufrió tres interpretaciones a lo largo del siglo XIX. La primera entendió el calor en base a la creencia hipotética de que es fruto del movimiento de las moléculas de los cuerpos, por lo que se trató de la concepción más cercana al atomismo. Esta concepción se circunscribió mayormente a los gases, dejando de lado los líquidos y los sólidos, que fue desarrollada por Joule, Waterston, Krönig

y Clausius. Una segunda visión fue la de Helmholtz, que vino a decir que el calor es una forma de movimiento, pero sin querer determinar de qué naturaleza estaba hecho. Como la anterior, siguió en la línea de querer explicar los fenómenos del calor por medio de la mecánica clásica. El último procedimiento fue el más acertado por precavido, al aceptar la idea de su provisionalidad, y al entender que tal vez los modelos derivados del electromagnetismo, y no de la mecánica, eran los de mayor adecuación para interpretar este tipo de fenómenos. El principio general de la conservación de la energía, en este caso, ofreció una concepción unitaria de la naturaleza, al contemplar en su seno los fenómenos mecánicos, eléctricos, y del calor.

En este proceso de transformación de la ciencia abierto por la termodinámica y el electromagnetismo, la observación de los fenómenos y los límites antepuestos ante ella, desempeñaron un papel primordial.

*Pero la termodinámica sólo encontró su verdadera interpretación el día en que los Boltzmann y los Gibbs, adoptando la hipótesis atómica, pudieron dar cuenta de las leyes de la termodinámica, aplicando a los innumerables elementos de los que se compone todo cuerpo material ponderable, las leyes de la mecánica estadística. Nos han enseñado que, si pudiéramos ver los movimientos de los elementos materiales en muy pequeña escala, estos movimientos se nos aparecerían como regulados por las leyes rigurosas de la mecánica clásica; pero como nuestros sentidos groseros nos permiten solamente percibir el resultado global de todos estos movimientos elementales, es calculando el resultado estadístico medio de todos los determinismos elementales como podemos obtener las leyes realmente observables a nuestra escala; y procediendo así se ve, ¡oh maravilla!, desprenderse de la confusión inextricable de los movimientos particulares, las leyes simples y generales de la termodinámica.<sup>14</sup>*

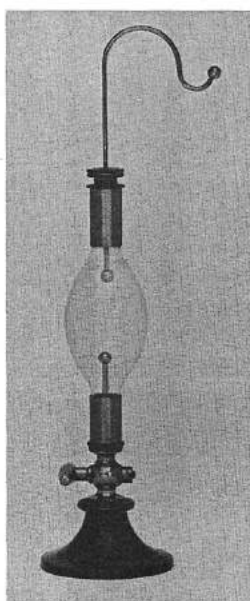
La crisis abierta en la ciencia volvió a reavivar la antigua disputa entre teóricos y experimentalistas, siendo la observación y la reivindicación de teorías más o menos intuitivas el eje de las discusiones. Frente a los partidarios del atomismo, surgió la escuela de los *energetistas*, que cansados de imágenes concretas con las que comprender los fenómenos -léase los átomos, o el éter - decidieron defender posiciones más abstractas y pensar que sólo la formulación matemática de los hechos o las relaciones formales establecidas entre ellos, podían dar buena cuenta de los éxitos en estas ramas de la ciencia. Sus ideas entroncaban con el pensamiento de Kant de separar el *fenómeno*, hecho que puede ser captado por nuestros sentidos, del *noúmeno* o esencia del mismo, inabordable por vías sensoriales<sup>15</sup>. La fotografía, en este contexto, apostó por las corrientes más realistas, al materializar los espectros y las sombras en sus placas, al tiempo que retrató de forma fiel al positivismo y al materialismo imperantes una realidad social repleta de convulsiones. Ante estas nuevas ramas de la ciencia, la fotografía se presentó con su poder de paralización del tiempo, a la manera de una *neguentropía óptica*, paralizante, que devolvía a una sociedad inquieta la imagen de sí misma. Como sucedió en ciencia, el espejo fotográfico en el que se miraron nuestros antepasados, mostró a veces un paisaje idealizado y difuminado por las técnicas pictorialistas, en consonancia con la opereta y el *l'art pour l'art*; y otras, el rostro descarnado de la historia, tal como quedó recogido por la novela y la pintura, propias del realismo y el naturalismo<sup>16</sup>. La mecánica estadística marcó el inicio de

la aceptación de la indeterminación y la incertidumbre en el seno de la ciencia. Los energetistas y los atomistas, tan solo fueron el exponente de una lucha ancestral, que no sería la última vez en producirse. La formulación del principio de indeterminación, unos años más tarde, volvería a avivar esta antigua polémica, obligando a los científicos a una nueva toma de posiciones, entre estos dos polos discordantes, representados por los conceptos de materia e idea, de experiencia y razón, de ser y pensamiento.

### 3.2. Las primeras imágenes electrónicas

Con el devenir de los años, los productos iconográficos de la fotoquímica comenzaron a dar paso a los de la fotoelectricidad. Una amplia variedad de formas y procedimientos fotoeléctricos comenzó a producirse en consonancia con un mayor conocimiento en esta nueva rama de la ciencia. Los procesos electrostáticos originaron, por un lado, un tipo de imagen que con el tiempo confluyó en sistemas tan omnipresentes hoy día como los reprográficos, faxes, escáneres e impresoras. Por su parte, la electrolisis y la galvanoplastia están ligados a otras fuentes de producción de imágenes en el conjunto de las artes gráficas y del modelado en relieve de figuras. Por último, la aparición de la electrónica a partir de mediados del siglo XIX, generó un nuevo tipo de tecnología que afectó profundamente al conjunto de los procedimientos arriba enumerados, a la vez que supuso la creación de una nueva tecnología de la imagen. La electrónica, o rama de la electricidad dedicada a los fenómenos eléctricos de pequeña escala, ha experimentado un largo recorrido en cuanto a sus técnicas y principios. El control preciso y refinado que la ciencia ha conseguido con la energía eléctrica, ha permitido la edificación de una tecnología, como es la electrónica, que afecta hoy día prácticamente a todas las parcelas del conocimiento humano y a cada una de las áreas productivas. Difícilmente podríamos encontrar en nuestro entorno más próximo un producto tecnológico en el que no esté presente, de una forma u otra. La simbiosis que se produce en nuestros días entre las dos tecnologías más representativas de nuestro tiempo, como son las comunicaciones y la informática, se debe fundamentalmente al avance experimentado en esta rama de la ciencia. Y la imagen tecnológica no ha podido escapar a su influencia de ninguna de las maneras. En el largo periplo de su desarrollo, próximo a los dos siglos, encontramos dos fases bien diferenciadas. Una, correspondiente a su primer siglo de existencia, que se extiende desde mediados del siglo XIX a mediados del XX, y que está caracterizada por la utilización de la tecnología de tubos de vacío y de las válvulas termoiónicas. Y una segunda, que se inicia con la invención del transistor en los años posteriores a la segunda guerra mundial, y que perdura hasta nuestros días. Esta segunda etapa queda profundamente marcada por el desarrollo de la *física del estado sólido*, especializada en el estudio y control de los materiales semiconductores. No está de mal insistir en que las clasificaciones precedentes obedecen más a fines expositivos que a una realidad altamente dinámica en la que se produce un intercambio constante de principios y procedimientos, y en la que el curso de los acontecimientos científico- técnicos marcha a tal velocidad que hace necesario una revisión y recapitulación constantes de los esquemas de análisis previos. Cada tecnología que aparece en la historia suele obligar a los científicos e historiadores a mirar hacia atrás, la mayoría de las veces para reconsiderar hechos escasamente atendidos del pasado, y para reencuadrar de nuevo el panorama presente bajo un esquema más integrador que permita seguir el camino.

La irrupción de la electricidad en la vida cotidiana de la sociedad del momento y la proliferación de los estudios de los fenómenos electromagnéticos, especialmente de aquellos observados en el interior de los tubos de vacío, o de los



**Fig. 3.1. Reproducción del huevo eléctrico de Abbé Nollet.**

producidos en su exterior por acción de éstos mismos, supuso un acicate para los fabricantes de bombas, que tuvieron que atender la creciente demanda por parte de los laboratorios y de la industria en general. El estudio de los fenómenos luminosos producidos por descargas eléctricas y asociados a la producción de vacío, se remonta a 1676, cuando Jean Picard observó una serie de destellos generados por el vaivén del mercurio de un barómetro que había sido emplazado en una habitación oscura<sup>17</sup>. También Francis Hauksbee, entre 1705 y 1711, estudió los fenómenos que fueron conocidos posteriormente como de *triboluminiscencia* o *electroluminiscencia*, que él atribuyó a la acción eléctrica y a la de fricción. Tal vez sea este autor el que consiguió por primera vez, en 1710, la producción de un destello de luz en el interior de una vasija de cristal sometida al vacío, y en la que se había insertado una pequeña cantidad de mercurio, lo que puede ser considerado como la primera lámpara de descarga de mercurio de la historia. Por su parte, Abbé Nollet, en París, consiguió también en 1740 generar una descarga eléctrica en el interior de una vasija ovalada que había sometido previamente al vacío, dándole el nombre de “*huevo eléctrico*” (Figura 3.1). Unos años más tarde, en 1851, William Watson produjo efectos luminosos, “*espectaculares*” en palabras del propio autor, mediante descargas eléctricas producidas en el interior de un tubo de cristal sometido al vacío<sup>18</sup>. Todas estas experiencias constituyen un claro antecedente de lo que se conocerá en el siglo XIX como *tubos de vacío* o *tubos de descarga* (Vacuum and discharge tubes), que representan una de las instrumentaciones científicas de mayor trascendencia en la ciencia y la tecnología posteriores, incluida la tecnología creadora de la imagen electrónica. Tanto Faraday como Davy y, más tarde, Heinrich Geissler y William Crookes, fundamentaron gran parte de sus investigaciones en este tipo de tecnología, construyendo sus propios tubos y bombas de vacío. El sometimiento de estos tubos a diferentes niveles de vacío o a la inyección de gases a baja presión facilitó el reconocimiento de una serie de fenómenos luminosos que, con el tiempo, recibieron los nombres de *zona oscura de Faraday* (1838), *bandas estriadas de Grove* (1852) y de *Gassiot*, *rayos positivos*, *rayos catódicos*, *rayos eléctricos oscuros de Tommasi*, *rayos de Goldstein*, etc.<sup>19</sup> Gran parte de estos experimentos ayudaron a Faraday a formular su tesis sobre la posible existencia de partículas de materia en los fenómenos eléctricos, algo que más tarde quedó confirmado por la detección de los electrones en el interior de estos tubos. En capítulos posteriores se expondrán con mayor profundidad los resultados de estas investigaciones en torno a los tubos de vacío, así como otros descubrimientos claves ligados a esta tecnología, de la relevancia de los rayos X, del electrón, de los rayos catódicos o del efecto fotoeléctrico, tan decisivos en la futura industria de la imagen, tanto en lo que a televisión se refiere como a fotometría, fotodetección, técnicas de escaneado o microscopía.

El modelo de actuación puesto en funcionamiento con estos dispositivos tuvo una gran trascendencia en la ciencia y la tecnología posteriores. Si partimos del hecho de que las descargas eléctricas producen chispas y arcos eléctricos a la presión ordinaria, tan pronto como son producidas en el interior de un tubo al que sometemos a diferentes grados de vacío, generan toda una serie de fenómenos que van desde la producción de luz -tal como observamos en los neones o en las bombillas más comunes-, a otros tipos de radiaciones, como pueden ser los rayos catódicos, canales, positivos, o los mismos rayos X. Por tanto, no fue hasta que las técnicas de producción de vacío y de descargas eléctricas fueron perfeccionadas a partir de mediados del siglo XIX, que este tipo de tecnología entró en su fase más



decisiva. En 1854, Heinrich Geissler, un constructor de tubos de cristal, fabricó su propia bomba de vacío accionada con mercurio. Esto le permitió construir el primer prototipo de tubo al vacío de la historia, con una vigencia de varias décadas en los laboratorios. Este consistió básicamente en una válvula de cristal sellada al vacío, con dos electrodos en su interior capaces de producir descargas eléctricas de mayor o menor intensidad. Los primeros ensayos experimentales con este nuevo tubo recayeron en manos de Julius Plücker, un científico de la Universidad de Bonn, que trabajaba en estrecha colaboración con Geissler. Este científico tuvo el privilegio de descubrir en 1858 algo tan fundamental como que las luces y resplandores que se producen en estos tubos se ven afectados sustancialmente por la presencia de campos magnéticos en las proximidades del cátodo. Curiosamente, las figuras luminosas adquirieron una disposición parecida a aquellas que Faraday observó en las limaduras de hierro activadas por los imanes. De hecho, el propio Faraday llevó a cabo experiencias similares junto con John Peter Gassiot en estas mismas fechas<sup>20</sup>. El conjunto de estas investigaciones coincidió con los primeros ensayos de H. Goebel, conducentes a la producción de luz por medio del calentamiento hasta el nivel de incandescencia de filamentos emplazados en el interior de los tubos, lo que constituye un antecedente directo de las primeras lámparas de luz eléctrica.

Por su parte, como comentamos en su momento, las bombas de vacío siguieron desempeñando un papel de primer orden en tecnologías afines a la producción de efectos luminosos e imágenes por medios electrónicos. Así, encontramos de especial relevancia la construcción en 1862, de la bomba de Töpler o bomba de mercurio, de gran aplicación en las investigaciones de rayos catódicos y de rayos X<sup>21</sup>. O la bomba de vacío de Geissler, en una versión desarrollada por Sprengel, determinante en la invención de la primera lámpara incandescente de filamento de carbón, por Thomas A. Edison.

Con el paso del tiempo, los efectos luminosos producidos en el interior de las ampollas fueron mejor controlados, adquiriendo unas propiedades y denominaciones muy precisas (Figura 3.2.). Mediante el control de las intensidades de las descargas, de los gases presentes en el interior de los tubos, o de los niveles de vacío, pudo comprobarse que la emisión de las radiaciones dependía por entero del cátodo, lo que dejó de manifiesto el aspecto negativo de las mismas. También se comprobó que los resplandores de tono verdoso que se producían en las paredes del cristal opuestas al cátodo, permanecían vivos, incluso una vez concluida la descarga. Johann Wilhelm Hittorf fue más allá, al interponer en 1869 un objeto opaco entre el cátodo y la pared opuesta del vidrio. De este modo, comprobó que la silueta del objeto quedaba marcada en medio del resplandor verdoso, deduciendo que los rayos se propagaban en línea recta a partir del electrodo negativo. Esta *sombra electrónica* proyectada en el interior de la válvula, puede ser considerada la primera imagen electrónica de la historia. A semejanza de las primeras fotografías de Niépce, en las que las siluetas de los edificios, vistos desde la ventana de su casa de Saint-Loup-de-Varennes, formaron una imagen indeleble, llena de sorpresa y misterio, esta primera sombra producida por el haz de electrones sobre la superficie fosforescente del cristal, marcó el comienzo de un camino muy fructífero que no tardó en desembocar en los rayos X, el osciloscopio, la televisión, los tubos vidicom, o el

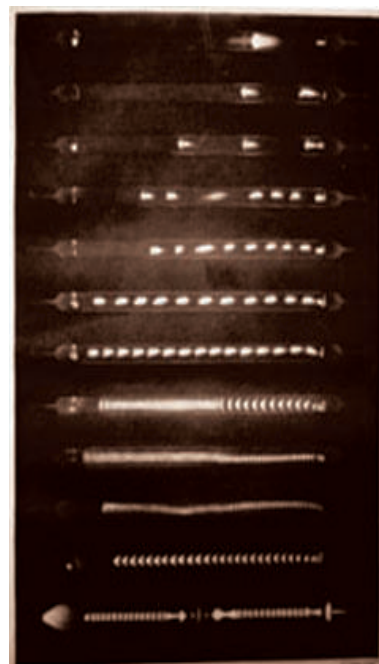


Fig. 3.2. Tubos de Crookes. 1880

microscopio electrónico, como exponentes más destacados de la imagen electrónica.

En la década de los setenta de este mismo siglo, las investigaciones con los tubos de vacío proliferaron por los laboratorios de todo el mundo. Todavía era temprano para reconocer en estos rayos la existencia de los electrones, aunque ya se comenzó a intuir su presencia. Eugen Goldstein inició una serie de ensayos colocando placas de metal recubiertas con distintos materiales en el interior del tubo, comprobando que experimentaban una serie de cambios químicos. También constató que los rayos, a los que bautizó en 1876 como *rayos catódicos*, se desprendían de este electrodo negativo de forma perpendicular a su superficie, y que podían converger en un punto si se le daba una forma parabólica al metal con el que estaba hecho el cátodo. Las similitudes con respecto al comportamiento de la luz fueron pronto señaladas. En estos años, destacó la figura de William Crookes en el nuevo escenario abierto por la electrónica, al experimentar insistentemente con todo tipo de tubos, y ensayando nuevas formas de producción de vacío más eficientes. Comprobó que en los niveles altos de vacío, los efectos luminosos dejaban de producirse, y que en este estado, la fuerza de las radiaciones opera con mayor vehemencia, provocando calor e incluso algún tipo de fuerza mecánica. Este tipo de fenómeno le hizo creer en un cuarto estado de la materia, y le llevó a enunciar una nueva disciplina científica denominada *radiometría*, dedicada eminentemente al estudio y medición de la materia radiante<sup>22</sup>. Basándose en las experiencias de Hittorf, ideó el *tubo de sombra* con el que produjo imágenes similares (Figura 3.3). La creencia de que los rayos estaban compuestos por partículas comenzó a levantar cierto recelo entre los defensores de la teoría ondulatoria de la propagación de las radiaciones. Entre éstos, se encontraba el propio Hertz, quien comprobó en la década de los ochenta que los rayos catódicos son capaces de atravesar ciertas placas de metal muy finas. Este hecho fue corroborado en 1894 por Philipp Lenard mediante un montaje experimental muy elaborado: utilizó un tubo abierto por los dos extremos; en un lado, colocó el tubo emisor de rayos catódicos, y en el otro instaló una especie de ventana cerrada con láminas de aluminio muy finas. De este modo, comprobó cómo los rayos atravesaban el metal hasta sobrepasar varios centímetros. Este hecho le llevó a afirmar que los haces debían estar compuestos por algún tipo de partícula más pequeña que el átomo, tal como se confirmó años más tarde con el aislamiento del electrón. Al año siguiente, Jean B. Perrin comprobó mediante un montaje parecido que las partículas eran de carga negativa y de una magnitud discreta. Es más, demostró experimentalmente que los rayos podían ser desviados en su trayectoria por la acción de campos magnéticos, algo que no pudo detectar Hertz en su día dada la escasa intensidad de los campos por él utilizados.



Fig. 3.3. Anuncio de los rayos X. Sombras de Crookes en su interior. 1896.

La gran sorpresa se produjo hacia finales de ese mismo año de 1895, cuando Wilhelm Röntgen, encerrado en un cuarto oscuro, activó un tubo de Crooke de gran potencia, comprobando cómo se producía un resplandor en un cristal fluorescente situado a cierta distancia. A continuación, quedó admirado al observar que el resplandor se seguía produciendo aún colocando objetos opacos a su paso, incluido su propio cuerpo. A lo pocos días, probó con una serie de objetos, tales como una brújula, su propia mano con el anillo de desposado, o una rana, depositados sobre placas fotográficas, y acto seguido activó el tubo de vacío (Figura 3.4, 3.5 y 3.6.). La *nueva fotografía*, tal como se dieron a conocer los rayos

X en un principio, quedó inventada de este modo. El impacto de esta nueva tecnología en la ciencia y en la sociedad del momento no se hizo esperar. Y con ella, quedó fijada una de las técnicas - en esta caso mixta: fotográfica y electrónica-, de producción de imágenes más fructífera de la historia. A los pocos meses, esta hazaña se



*Fig. 3.5. Radiografía de una mano con anillo. 1895. Wilhem Röntgen.*

vio coronada con un nuevo descubrimiento trascendental: la radioactividad. En esta ocasión, fue a cargo de Henri Becquerel, hijo de Edmond, al que he dedicado destacados comentarios. La fotografía desempeñó también un papel crucial en este hallazgo, inaugurándose una nueva época para la ciencia y la historia de la humanidad<sup>23</sup>. En este caso, no fueron utilizados tubos de vacío, sino los materiales radiactivos en bruto puestos en contacto directo con las placas fotográficas. Tanto un descubrimiento como otro, fueron determinantes en el estudio del universo de las partículas atómicas, actividad que se inició sin demora.

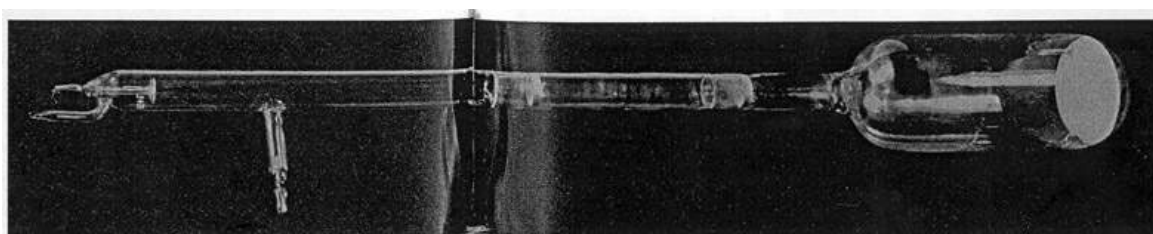


*Fig. 3.4. Cuadrante de una brújula fotografiada a través de la caja que la contiene. (Radiografía enviada por Röntgen a Henri Poincaré). c.a.1895.*

Atento a estos descubrimientos, Ferdinand Braun construyó en 1897 un tubo de vacío al que denominó el *tubo indicador*, y que se convirtió en el primer tubo de rayos catódicos de la historia, tal como es concebido hoy día este tipo de dispositivo. Fue diseñado con el objetivo de permitir la visualización de la acción de los rayos desprendidos del cátodo. Para ello, construyó un tubo alargado de unos treinta y cinco centímetros (Figura 3.7), colocando el cátodo en un extremo. Cerca de éste emplazó el ánodo, en una protuberancia saliente del vidrio; y en el otro extremo del tubo, en la esfera formada por el cristal, emplazó una lámina de mica traslúcida, revestida con una sustancia fosforescente que adhirió a la pared interna del cristal. A lo largo del tubo, colocó una serie de elementos: un diafragma consistente en una placa con un pequeño orificio que permitía controlar el paso y el diámetro del rayo; y una serie de deflectores magnéticos en su parte exterior con los que pudo desviar el curso del mismo. Los rayos llegaban de esta forma a la pantalla de mica y excitaban el material fosforescente produciendo una serie de destellos o de marcas luminosas. Este es el principio de una tecnología de la imagen cuyo máximo exponente fue con el tiempo la televisión. La idea original de Braun estuvo dirigida a cubrir necesidades muy concretas de la producción y distribución de electricidad por las primeras centrales eléctricas instaladas en numerosos países de Europa. Braun quiso hacer de su tubo un instrumento de visualización de las



*Fig. 3.6. Rana, 1896. Wilhelm Röntgen.*



*Fig. 3.7. Tubo indicador de Braun. 1897.*



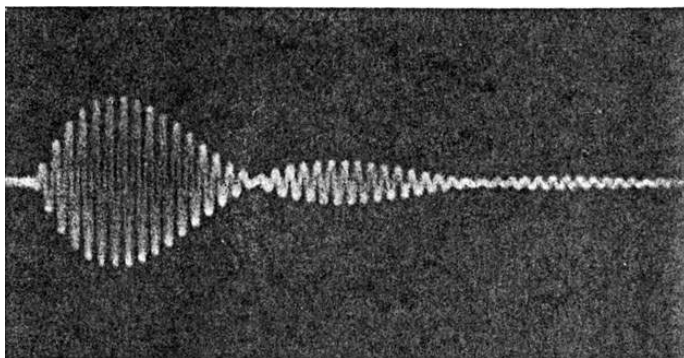


Fig. 3. 8. Fotografía de una descarga oscilatoria. Zenneck. J. De la obra *A treatise on Electricity*, de Pidduck, F. R. 1916.

de Braun con el constructor de tubos Franz Müller, un colaborador de Geissler, dio lugar a la fabricación, a nivel experimental, de numerosos tubos de rayos catódicos. La técnica fue depurándose, tanto en lo que a producción de alto vacío se refiere como al uso de generadores de descargas más potentes, o al de espejos rotatorios para facilitar la visualización de los fenómenos. El aislamiento de los rayos con el uso de más de un diafragma y con la aplicación de campos magnéticos a su paso, dio lugar a la formación de imágenes en la pantalla fosforescente relativas al impacto de los electrones, o a las oscilaciones que terminaron por formar bellas figuras de Lissajous con la ayuda de espejos giratorios o con el posicionamiento de dos deflectores magnéticos. Las primeras letras o signos del alfabeto iconográfico electrónico comenzaron a construirse, de esta forma, en la pantalla para admiración de todos: líneas oblicuas, horizontales o verticales, elipses, círculos, bucles, etc., que obedecían al sentido de las corrientes, y a la coincidencia o no de sus intensidades y fases. En 1899, Jonathan Zenneck, un ayudante de Braun, comenzó a tomar fotografías de estas figuras directamente de la pantalla fosforescente, abriendo un campo de exploración inmenso a los científicos, e inaugurando un período de estrecha colaboración entre estas dos técnicas de producción de imágenes<sup>24</sup> (Figura 3. 8).

Una tercera vía de experimentación con los tubos de vacío, complementaria de los hallazgos tan importantes efectuados por Röntgen y Braun, fue la iniciada por J. J Thomson. La figura de este científico merece un puesto de honor en la historia de la ciencia, pues tuvo el privilegio de aislar el electrón como unidad mínima eléctrica. Para ello, se basó en un trabajo minucioso y concienzudo con la tecnología de los tubos de vacío. Para entonces, se sabía que los rayos catódicos podían ser desviados de forma controlada, que eran capaces de producir imágenes sorprendentes, se

oscilaciones y de los fenómenos transitorios producidos en los circuitos eléctricos, algo directamente relacionado con el futuro osciloscopio. En este sentido, el tubo de Braun apareció en un momento muy propicio para los ingenieros eléctricos, que pudieron visualizar en todo sus detalles el comportamiento de las corrientes alternas utilizadas, sus fases, intensidades, distorsiones, etc. En poco tiempo, la colaboración

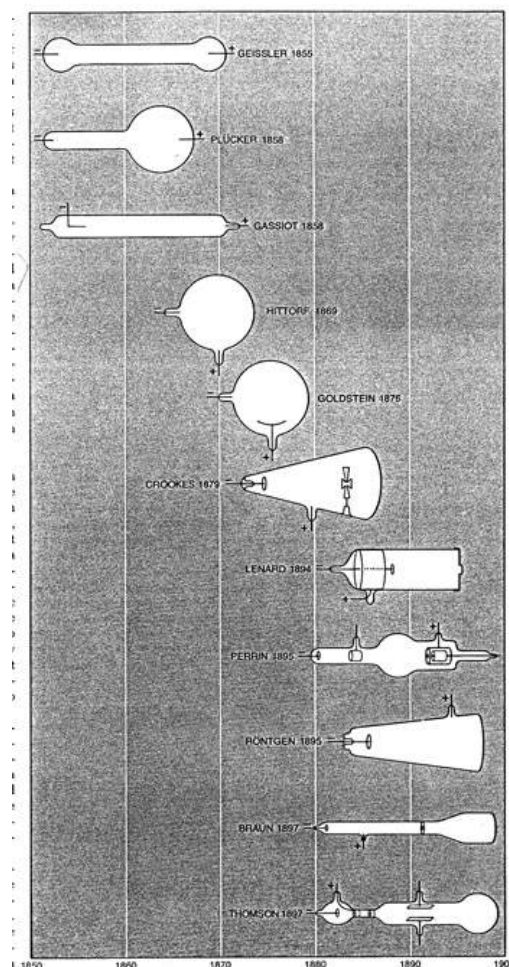
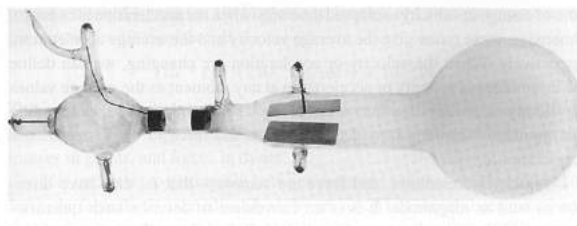


Fig. 3.9. Tubos de vacío. De Geissler a Thomson.



conocía además, su valor negativo, o que estaban constituidos por partículas de un valor discreto. El siguiente paso fue determinar la identidad de estas partículas a partir de su aislamiento y medida, y conocer los valores de su masa y de su carga. Era pronto todavía, para vaticinar la enorme repercusión que iban a tener estas operaciones en el estudio de los elementos constitutivos de la materia. Es preciso resaltar al respecto, que los tubos de vacío experimentaron a lo largo de estos años una serie de modificaciones (Figura 3.9.), a raíz de la incorporación de nuevos dispositivos y de nuevos cometidos. De ser un instrumento eminentemente experimental para el estudio de las descargas eléctricas en el vacío, terminó por convertirse en una herramienta de visualización de fenómenos imprescindible para la ciencia. Al mismo tiempo, conformó la base de construcción de otras tecnologías tan fundamentales como la de lámparas incandescentes y de arco eléctrico, o la de válvulas termoiónicas, diodos y triodos, determinantes en la industria de la radiocomunicación. Pero para la creación de toda esta tecnología, fue preciso conocer previamente el comportamiento de las partículas constitutivas de lo eléctrico hasta sus más mínimos detalles, lo que significaba ahondar en los secretos íntimos de la materia<sup>25</sup>.



*Fig. 3.10. Tubo utilizado por J. J. Thomson para calcular la razón masa/ carga del electrón.*

El primer paso en esta dirección, lo dio Thomson construyendo un tubo que le permitió descomponer el rayo catódico en sus partes más elementales, y medir la carga de cada una de las partículas, en relación a su masa (Figura 3.10). Para ello, fabricó un tubo alargado, que tenía en un extremo el cátodo, unido a un generador que le suministraba una carga negativa. Este transmitía la corriente al ánodo y a un colimador, que estaban situados en sus proximidades. En el cuello central del tubo, situó dos placas deflectoras, conectadas a una batería encargada de proporcionar cargas de gran intensidad, de uno y otro signo, a cada una de ellas. Por último, el extremo opuesto al cátodo, formado por la parte más abultada de la ampolla, fue recubierto con una sustancia fosforescente que hacía visible la llegada de la radiación y de cada una de sus partículas. De este modo, el rayo se propagaba desde el cátodo hasta esta pantalla de visualización, dando a conocer tanto su diámetro o sección, que podían ser controlados por medio del ánodo y el colimador; como su dirección, fácilmente regulada con los deflectores colocados a su paso. El colimador convertía el haz original en un rayo muy fino, y las placas lo desplazaban, en mayor o menor cantidad, de manera que podía ser visualizado en forma de puntos resplandecientes en la pantalla fosforescente. La segunda ley del movimiento de Newton, que relaciona la fuerza o aceleración de los cuerpos con su velocidad y su masa, le sirvió de modelo para llegar a una serie de conclusiones determinantes. Midiendo variables tales como el desplazamiento de estos destellos en la pantalla, a la vez que lo relacionaba con la fuerza o aceleración del rayo; o midiendo la longitud del área donde tenía lugar la deflexión, la longitud relativa al espacio donde se producía el desplazamiento hasta llegar a la pantalla, y la carga utilizada en la deflexión, pudo estimar la carga; en este caso, a partir de la velocidad de las partículas y de la masa de cada una de ellas. Tanto en el procedimiento experimental, que sufrió varias modificaciones a lo largo de los años, como en las conclusiones a las que llegó Thomson, fue determinante distinguir entre la desviación del rayo debido a la fuerza eléctrica y a la magnética; pues, mientras una proporcionaba la velocidad de las partículas; la otra, ofrecía los valores de la relación entre masa y carga. Para determinar esta relación, dirigió el rayo catódico directamente sobre una placa de metal a modo de colector; así pudo detectar la carga eléctrica de cada una de las partículas y la energía cinética,

convertida en calor. La razón entre la energía calorífica y la carga eléctrica depositada en el colector, le proporcionó la relación entre la energía cinética y la carga de cada partícula<sup>26</sup>.

La conclusión más sorprendente a la que llegó Thomson en 1897, a partir de todos estos experimentos, fue que las partículas detectadas, y que recibieron el nombre de electrones<sup>27</sup>, eran más pequeñas que los propios átomos, y que se producían de igual forma y con las mismas características, independientemente de qué compuestos estuvieran presentes en el cátodo.

*Hemos visto que si engendramos los corpúsculos por rayos catódicos, luz ultravioleta o metales incandescentes, sean cuales fueren los metales y gases presentes, obtenemos siempre la misma clase de corpúsculos. Puesto que pueden obtenerse corpúsculos análogos en todos los conceptos por muy distintos agentes y materiales, y puesto que la masa de los corpúsculos es menor que la de cualquier átomo conocido, se colige que el corpúsculo debe ser un constituyente del átomo de muy diferentes sustancias. Que, en suma, los átomos de estas sustancias tienen alguna cosa en común.*<sup>28</sup>

Es importante señalar que en estos experimentos con tubos de vacío, caracterizados por la producción controlada de electrones, se encuentra el origen de toda la tecnología que se desarrolló posteriormente en el siglo XX, presente en multitud de instrumentos científicos que van del osciloscopio a los aceleradores de partículas. Mientras que los tubos de vacío de finales del siglo XIX producían haces de electrones de una energía cinética equivalente a unos cientos de electrón-voltios (eV)<sup>29</sup>, los primeros aceleradores desarrollados en la década de los treinta del siglo siguiente fueron capaces de producir energía cinética de protones de un millón de electrón-voltios. Los actuales aceleradores llegan a energías cinéticas de protones y antiprotones de  $8 \times 10^{12}$  eV. La generación artificial de estos haces de partículas no supera las energías producidas de forma natural por los rayos cósmicos, que llegan incluso a energías de  $10^{21}$  eV, pero sus niveles han posibilitado el estudio del comportamiento de los átomos y de numerosas partículas fundamentales<sup>30</sup>.

### **3.3. La fotografía en la configuración del universo atómico.**

*Elijo para este propósito el año 1895, un año de cambio de rumbo en la historia de la física, en el que se asistió al descubrimiento de los rayos X, y acto seguido, de la radioactividad y del electrón. La elección de este año, me parece conveniente por marcar de una forma natural una línea divisoria entre la vieja y la nueva física.*<sup>31</sup>

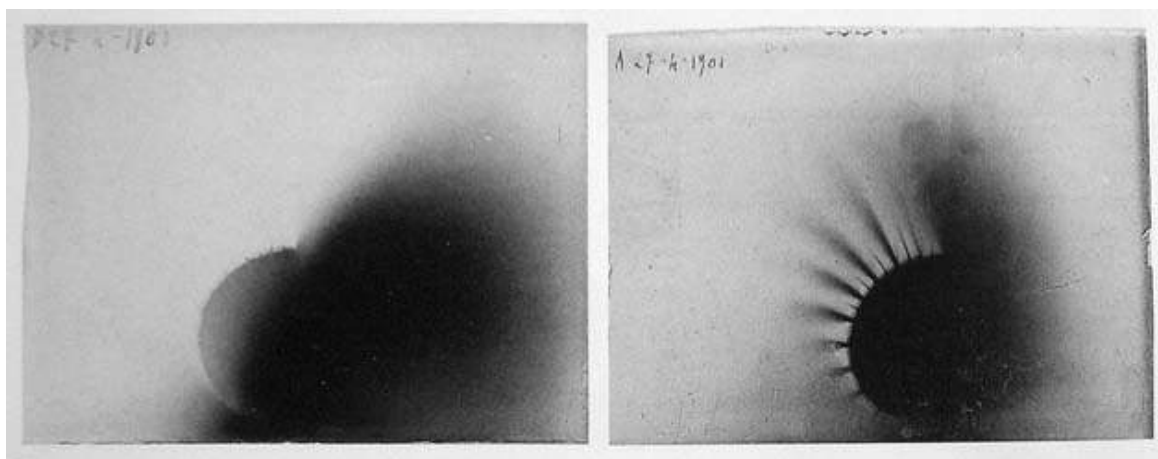
Ernest Rutherford

El período comprendido entre la aparición de los rayos X hacia finales de 1895, y las primeras formas de imagen electrónica como tal, una vez que la imagen vídeo

consigue consolidarse como medio de visualización de fenómenos físicos, y adoptar unas fórmulas más o menos comerciales con la aparición de la televisión electrónica hacia principios de la década de los treinta, se caracteriza por ser un período en el que la fotografía convencional adquiere una mayoría de edad respecto de sus procedimientos. Es más, la fotografía pasa a convertirse en una instrumentación clave para la construcción de una serie de dispositivos de observación, esenciales para el avance científico y, más concretamente, para el estudio del universo atómico. No obstante, si la fotografía se bastó por sí sola hasta finales del siglo XIX para cumplir las exigencias de la ciencia con la ayuda de sus cámaras, lentes y emulsiones, produciendo resultados de primer orden, en esta ocasión, tuvo que buscar el apoyo de las diferentes tecnologías que el electromagnetismo había ido desarrollando en esos mismos años, para conseguir la proeza de desvelar el mundo íntimo de las partículas atómicas. Los rayos X son un resultado ejemplar de esta alianza. Tradicionalmente, han existido dos formas de producción de este tipo de radiación: mediante isótopos radiactivos y por medio de tubos de vacío. Toda vez que mantengamos una porción de un elemento radiactivo, como puede ser el cobalto, el radio, el uranio o el estroncio, encerrada en un depósito de plomo al que perforamos un pequeño orificio, conseguimos una fuente de radiación con las características de los rayos X. De hecho, las radiaciones gamma, propias de los elementos radiactivos, pertenecen en gran medida a la franja espectral de los rayos X. Esta forma de producción de rayos X tiene la ventaja de ser una fuente de radiación prácticamente inagotable, equilibrada y constante, pero presenta serios inconvenientes, especialmente a la hora de ser utilizada en un contexto de captación de imágenes, por su peligrosidad y por la dificultad de controlar los tiempos de exposición. Son éstas las razones por las que tradicionalmente se ha preferido la generación eléctrica de este tipo de radiación, especialmente en el ámbito industrial y en el médico, donde gozan de una mayor presencia.

El procedimiento básico, que se mantiene desde los años de Röntgen, consiste en la aceleración de un rayo de electrones a altas velocidades, mediante la generación de un campo eléctrico de gran voltaje. El rayo producido se hace chocar con un ánodo diseñado específicamente para esta técnica, surgiendo la radiación como efecto de este impacto. Hay que tener en cuenta, que sólo una pequeña parte de los electrones acelerados es convertida en este tipo de rayos, puesto que la mayor parte de la energía se disipa en forma de calor. Dependiendo de la intensidad del voltaje producido, se logra un tipo de radiación de mayor o menor longitud de onda, y por tanto de mayor o menor penetrabilidad. La tecnología de rayos X se ha apoyado tradicionalmente en un tipo de emulsión fotográfica especial de grano muy fino, si bien existen emulsiones duras de alta velocidad de procesamiento y gran contraste para situaciones que así lo requieren<sup>32</sup>. La resolución en la técnica de rayos X depende más de los grosores de los objetos que del tamaño, en términos absolutos, de las dimensiones más pequeñas que pueden ser resueltas, como ocurre en la fotografía aplicada en áreas más convencionales. Se trata de encontrar una determinada longitud de onda, una intensidad y una calidad de radiación que concuerden óptimamente con el objeto y sus dimensiones. La fotografía de sales de plata ha aportado hasta hace unos años niveles de calidad de imagen superiores a los sensores electrónicos; si bien es cierto que estos últimos han terminado por imponerse, entre otras razones, por su rango dinámico más amplio, y su mayor facilidad para posibilitar técnicas de visualización en vivo.<sup>33</sup>

Como salió a relucir en páginas anteriores, al año siguiente de producirse el descubrimiento de los rayos X, Henri Becquerel encontró de forma accidental y por procedimientos fotográficos una nueva fuente de radiación<sup>34</sup> (Figura 3.11.). Las diferentes partículas y radiaciones que se producen dentro del espectro radioactivo, y que en su conjunto son de mayor penetrabilidad que los rayos X, han



*Fig. 3.11. Desviación de rayos secundarios producidos por la radiación beta, 1901. H. Becquerel.*

dado lugar a una serie de técnicas de visualización en las que la fotografía convencional ha desempeñado un papel indispensable.

### **3.4. El descubrimiento de la radioactividad**

El estudio de las fuentes radioactivas y de sus efectos en las placas fotográficas y en otros instrumentos de observación y medición, tal vez sea uno de los caminos más directos con los que ha contado la ciencia a la hora de emprender la gran tarea de descifrar el universo atómico. La relación entre fotografía y materiales radiactivos se remonta a principios del XIX cuando varios experimentadores estudiaron el efecto de la luz sobre distintos compuestos, entre ellos, el uranio. Adolphe Ferdinand Gehlen fue uno de los primeros en investigar en 1804 los colores alimonados que el cloruro de uranio producía al ser disuelto en alcohol, así como los cambios que experimentaba hacia un verde viscoso al ser expuesto a la luz. Este mismo autor ensayó también con el cobalto, sin encontrar efectos tan llamativos<sup>35</sup>. Posteriormente, en 1848, Niépce de Saint- Victor experimentó con las sales de uranio a instancias del propio Edmond Becquerel, sin encontrar resultados prácticos. Sería J. C. Burnett, quien logró inventar en 1857 un proceso de copiado por medio del nitrato de uranio, lo que sirvió, nuevamente a Niépce de Saint Victor, para lograr en 1860 un sistema de copiado por medio de este tipo de sales. Es de resaltar, que el uranio se venía utilizando en la industria de la cerámica de Bohemia como pigmento para obtener una serie de tonos fluorescentes, singularidad que atrajo la atención de los científicos.

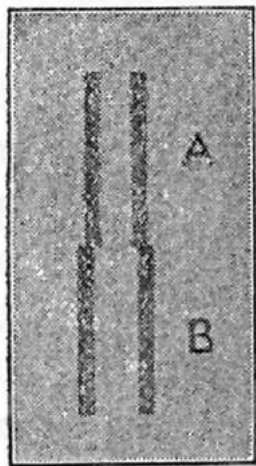
En otros ámbitos de la investigación, no necesariamente destinados a la búsqueda de procedimientos de creación de imágenes, la fotografía prestó también una gran ayuda como instrumento de observación y de estudio de este tipo de materiales. Se comenta que fue el matemático Henri Poincaré el que instó a Henri Becquerel a utilizar las sales de uranio en sus investigaciones, intuyendo que podrían constituir una nueva fuente de producción de rayos X. Los escritos de este matemático suscitaban la curiosidad de otros investigadores, entre ellos Charles Henry, que ensayó con distintas piezas de metal embadurnadas con sulfuro de zinc, colocándolas sobre placas fotográficas y sometiéndolas a los rayos X. O Gustave Le Bon, que se interesó por los efectos que la luz y otras radiaciones producen a través de los cuerpos opacos, con la utilización de fotografías expuestas durante horas a la luz de lámparas de petróleo, y sometidas a revelados intensos<sup>36</sup>.



En la época del descubrimiento de los rayos X y de las propiedades radioactivas del uranio, las investigaciones de las propiedades fluorescentes y fosforescentes de los materiales expuestos a este tipo de radiaciones por medio de la fotografía se multiplicaron. William Crookes, Marie Curie, o el propio Ernest Rutherford, estuvieron muy pendientes de estos descubrimientos. A medida que las distintas radiaciones emitidas por las sustancias radioactivas fueron identificadas como rayos alfa y beta, numerosos investigadores se pusieron manos a la obra, e intentaron fotografiar sus efectos. Tal fue el caso de Paul Villard, que en 1900 detectó con un método fotográfico una nueva radiación bautizada como gamma, una radiación perteneciente a la franja del espectro de los rayos X, pero de mayor fuerza y penetrabilidad. Su descubrimiento fue accidental, porque fue el estudio de la penetrabilidad de los rayos X en los metales lo que en realidad había emprendido. El procedimiento seguido por este autor, consistió en añadir cloruro de radio al cátodo del tubo de descarga, para de esta forma poder constatar que las radiaciones sobrepasaban el espesor de las planchas. Su sorpresa fue al comprobar que los rayos no se desviaban por la acción de un campo magnético aplicado, tal como suele ocurrir con los rayos catódicos. Una interpretación más exhaustiva de este hallazgo la llevó a cabo Rutherford unos años después, al establecer claras diferencias entre los rayos gamma ( $\gamma$ ), y los alfa y beta ( $\alpha$  y  $\beta$ ).

En el ámbito de los estudios sobre la radioactividad destacaron las figuras de este físico y Marie Curie. Estos dos científicos de renombre son los máximos responsables de los principales descubrimientos en esta área, y hasta cierto punto representan dos paradigmas de hacer ciencia si atendemos a la forma y grado en que utilizaron la instrumentación científica, en especial aquella creadora de imágenes. Mientras que Curie fue la principal encargada del descubrimiento de los nuevos materiales radiactivos, como el radio, el torio y el polonio, a partir de concienzudas y meticulosas mediciones con el electroscopio; Rutherford terminó por construir uno de los primeros modelos del universo atómico a partir del estudio de la propagación y de los impactos de las radiaciones y sus partículas. Para ello, se valió de una serie de técnicas como la cámara de ionización, el centelleador, el contador Geiger y la propia fotografía, tanto como técnica autónoma como complemento imprescindible de la cámara de niebla. Su intenso trabajo en esta área de la física le ayudó a conseguir, por primera vez en la historia, la transmutación de un elemento en otro. Esta hazaña científica la consiguió mediante el bombardeo intensivo del núcleo atómico de ciertos metales con los nuevos tipos de radiación descubiertos, cumpliendo así el sueño de los viejos alquimistas.

La entrada en escena de la cámara de niebla en 1911, proporcionó a la fotografía un papel de primer orden en este tipo de investigaciones. No hay que olvidar que, por entonces, las técnicas fotográficas gozaban de una gran presencia en los laboratorios y en las publicaciones científicas dedicadas a recoger sus avances y aplicaciones más notables. De hecho, fue en una de estas revistas, dedicadas a la fotografía científica, donde Marie Curie publicó gran parte de sus artículos en su idioma materno, el polaco<sup>38</sup>. Hasta qué punto los instrumentos de exploración y de medición afectan a la estructuración de las leyes y a la concepción de nuevas teorías es una materia de sumo interés, especialmente por sus connotaciones epistemológicas. Los modelos de aproximación al estudio de la radioactividad de Curie y Rutherford conforman dos fórmulas muy diferenciadas de proceder, con unos resultados concretos que, a mi parecer, son fruto de esas prácticas. Mientras que las mediciones estrictamente experimentales de Curie le llevaron a resultados muy concretos sobre la existencia de nuevos materiales radiactivos, la familiaridad de Rutherford con técnicas más próximas a la observación directa e indirecta de los fenómenos radiactivos, probablemente, fue decisiva a la hora de configurar su imagen física de la estructura y comportamiento del átomo<sup>39</sup>. No debemos olvidar que la instrumentación más utilizada por



*Fig. 3.12. Fotografías del retardo de los rayos alfa. Rutherford. 1911.*

Rutherford está estrechamente ligada a lo sensorial. El centelleador de sulfuro de zinc fosforescente es una pantalla que permite observar el impacto de las diferentes partículas en forma de destellos luminosos, siendo éste uno de los instrumentos más utilizados a partir de 1903 por el físico neozelandés para la detección y análisis de los rayos alfa y beta. Además, en muchas ocasiones aplicó a esta técnica la propia fotografía y el microscopio para fijar los destellos y realizar recuentos más exhaustivos de los mismos. La cámara de niebla, considerada por él uno de los inventos más extraordinarios de la historia de la física, fue también un instrumento ampliamente utilizado en estas labores. Todo ello, sin menoscabo de la propia fotografía, que fue esencial en multitud de estudios, como en la demostración del retardo de los rayos alfa al atravesar diversos materiales, en su paso a través de campos magnéticos, o al comprobar los efectos de la radiación producida por láminas de radio en las emulsiones fotográficas<sup>40</sup> (Figura 3.12). Complementariamente, utilizó desde su aparición en 1908, el contador Geiger, así como los primeros fototubos electrónicos y válvulas termoiónicas

para la detección de pequeñas intensidades de corriente generadas por las partículas. Su visión de un universo atómico, caracterizado por un núcleo central y de reducido tamaño, en torno al cual giran las diferentes capas de electrones al modo de un sistema planetario en miniatura, fue una imagen decisiva en la historia de la ciencia. No sería aventurado afirmar que esta representación guarda una relación muy estrecha con los diferentes trazos que la fotografía y la cámara de niebla fueron desvelando.

### 3.5. La cámara de niebla

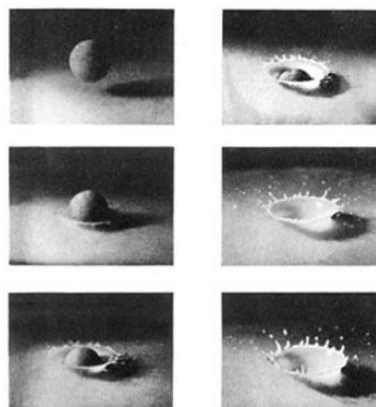
El interés por las nubes desde un punto de vista científico, comenzó a surgir a principios del siglo XIX, en consonancia con el espíritu abierto por la Ilustración y por el espectacular avance de las ciencias a lo largo del siglo XVIII. La primera clasificación de este tipo de fenómeno atmosférico, se debe a Luke Howard, quien ideó en 1802-3 un sistema inspirado en la taxonomía de Linneo<sup>41</sup>. Este espíritu pronto caló en las formas de representación de las nubes tanto en la pintura como en las ilustraciones de carácter científico. John Constable o Alexander von Humboldt son dos claros exponentes de esta influencia. El interés por las nubes, concretamente, por sus diferentes tipos, formación y comportamiento, o por los efectos atmosféricos producidos en ellas, fue determinante a la hora de Charles. T. R. Wilson idear su cámara de niebla. Es sintomático que la fotografía, que fue con el tiempo un elemento esencial de este instrumento, estuviera presente en los trabajos previos que condujeron a su invención. La fotografías que este físico solía hacer de las nubes (Figura 3.13), con un interés mitad artístico, mitad científico, propio de la época victoriana<sup>42</sup>, fueron altamente inspiradoras en los años de gestación de este nuevo instrumento. En sus excursiones al observatorio astronómico de Ben Nevis, en Escocia, su tierra natal, Wilson acostumbraba tomar fotografías de los extraños fenómenos que acompañan el movimiento de las nubes



*Fig. 3.13. Fotografías de montañas y nubes, c.a. 1890. CTR Wilson.*

en esas altitudes. Previamente, John Aitken, del círculo de científicos al que pertenecía Wilson, había estudiado con denuedo diversos fenómenos naturales, como el humo resultante de las explosiones de los volcanes, o los movimientos del mar. Su meta era reproducirlos a pequeña escala en su laboratorio, mediante descargas eléctricas activadas en vapor, o en recipientes de agua entintada que sometía a corrientes de aire, respectivamente. Incluso llegó a construir en 1888 una *cámara de polvo* para hacer visibles y medir las partículas presentes en el aire, con la intención de aplicarlo al estudio climatológico. Todas estas ideas y ensayos fueron determinantes en los trabajos de Wilson.

La cámara de niebla fue concebida, en un primera aproximación, hacia 1895. La idea del dispositivo de expansión la tomó prestada con toda seguridad de los inventos de Aitken, pero fue su llegada al laboratorio Cavendish, de Cambridge, lo que le proporcionó nuevas y decisivas pistas, especialmente, a la hora de decidirse por la utilización de los tubos de vacío y los dispositivos de descargas que, por entonces, se encontraban en pleno uso por los investigadores de ese laboratorio. Las descargas producidas en los diferentes gases, encaminadas al estudio de partículas, era un área de interés preferente en los laboratorios ingleses, donde la teoría corpuscular era defendida con ahínco desde los primeros ensayos de Faraday. La primera intención de Wilson con la cámara fue reproducir los efectos luminosos propios de las tormentas y del paso de la luz a través de las nubes, algo que consiguió con relativa facilidad. El aparato original consistió en un recipiente de cristal que permitía regular la presión interior mediante una bomba. Dentro, se colocaba vapor de agua sobresaturado y limpio de polvo, de modo que al reducirse la presión, éste se enfriaba de inmediato, produciendo un ambiente saturado de humedad. Si esta acción se hacía coincidir con una descarga o con la entrada de algún tipo de radiación en la cámara, cualquier partícula cargada eléctricamente, por mínima que fuera, creaba una condensación de vapor a su alrededor, formando una estela visible de diminutas gotas de agua condensada. Tan pronto como Wilson supo de los descubrimientos de Röntgen y de Becquerel no dudó en aplicarlos a su nuevo instrumento, constatando rápidamente la ionización de las partículas. El propio Rutherford estuvo presente en el laboratorio Cavendish cuando la cámara de niebla comenzó a gestarse en 1895<sup>43</sup>. C. T. R. Wilson ya había diseñado otros instrumentos, entre ellos, un electroscopio que fue decisivo en el estudio de las partículas radioactivas, pero fue con esta cámara con la que pasaría a la historia de la ciencia.



*Fig. 3.14. Salpicaduras. En "Un estudio de salpicaduras". M. A. Worthington. 1908*

*A este período, sin embargo, pertenece el desarrollo de un instrumento que, en mi opinión, es el más original y maravilloso de la historia de la ciencia - me refiero a la cámara de expansión o de niebla de C. T. R. Wilson.*<sup>44</sup>

Sin embargo, el hecho decisivo que proporcionó una nueva dimensión a la cámara de niebla fue cuando Wilson reparó en una serie de ensayos de fotografía de alta velocidad que se produjeron por la época, particularmente *A Study of Splashes*, de A. M. Worthington, obra aparecida en 1908 (Figura 3.14). Pensó que si era posible fotografiar con la técnica de la iluminación estroboscópica las gotas de los líquidos al caer a una velocidad de microsegundos, porqué no utilizar esa misma técnica para captar el paso de las partículas a través de su cámara. En



mayo de 1909 consiguió sus primeras fotografías, que pronto fueron de la admiración de los científicos, especialmente de aquellos dedicados a la exploración del mundo atómico. Un dato de interés para esta investigación, fue cuando Wilson comparó sus primeras fotografías, relativas a las trayectorias de las partículas alfa, y las comparó con los dibujos que William H. Bragg había hecho del mismo fenómeno, pero esta vez inspirado esencialmente por trabajos de corte teórico. (Figuras 3.15. y 3.16.) La coincidencia y la sorpresa no pudieron ser mayores. La imagen mental y la fotográfica establecieron una curiosa aproximación que nos hace recordar las representaciones, dibujos y figuras con las que anteriormente, científicos como Lichtenberg, Faraday, Maxwell o Hertz, habían emprendido trabajos tan fructíferos.

Para 1912, Wilson presentó la primera versión comercial de la cámara de niebla en medio de una gran expectación en el mundo científico (Figura 3.17.). Al poco tiempo, T. Shimizu fabricó una nueva versión más rápida, con la que se pudieron obtener fotografías, incluso estereoscópicas, del trazo de las partículas. Años más tarde, nuevamente Rutherford, no pudo ocultar su admiración por un instrumento que consideraba esencial para la exploración del universo atómico.

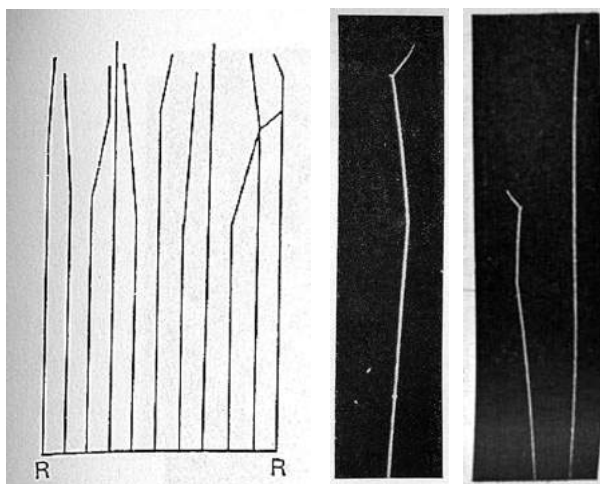


Fig. 3.15 y 3.16. Dibujos del trazo de partículas alfa a partir de intuiciones teóricas de W. H. Bragg. Y fotografías del trazo de partículas con cámara de niebla. C. T. R. Wilson.

*Cualquier persona con imaginación, que haya visto la preciosas fotografías estereoscópicas de los trazos de las veloces partículas alfa, de los protones o de los electrones, no puede por menos que maravillarse ante la perfección de detalle con que son recogidas sus cortas, pero enérgicas vidas.*<sup>45</sup>

Entre los cientos de científicos que hicieron uso de este nuevo instrumento, destaca la labor de P. M. S. Blackett, que pudo comprobar la desintegración del núcleo de nitrógeno mediante esta técnica. Aunque este hecho fue descubierto con anterioridad por Rutherford, con técnica de centelleadores, tras bombardear los núcleos atómicos con rayos alfa acelerados, Blackett consiguió fotografiar cerca de

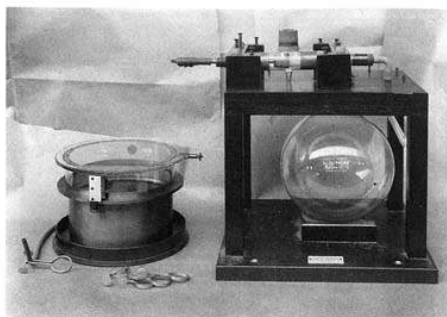


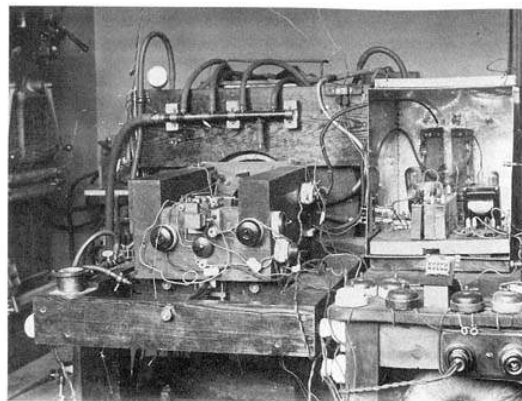
Fig. 3.17. Cámara de niebla comercial, 1913.

400.000 trazos de partículas<sup>46</sup>, entre los que encontró unas pocas anomalías que estudió concienzudamente. Estas fotografías corroboraron el hallazgo de su maestro, con la diferencia de que la visualización del hecho como tal permitió comprender que el fenómeno se debía más a un proceso de integración que de desintegración, tal como salió a relucir en un análisis pormenorizado del doble trazo resultante de la colisión. A partir de los años treinta, Blackett, asociado a G. P. S Occhialini, utilizó un nuevo modelo de cámara conectada a un dispositivo electrónico que se autodisparaba

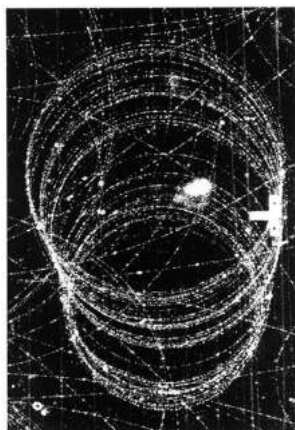


con la llegada de las partículas, técnica que le permitió el estudio en profundidad de los rayos cósmicos (Figura 3.18).

La cámara de niebla llegó a ser un instrumento fundamental en numerosas investigaciones. Su participación fue decisiva en la identificación del positrón, nueva partícula atómica; del efecto Compton, con el que se constató la doble naturaleza de los rayos X; en la transmutación del núcleo atómico, y en la detección de otras partículas como el muón o el neutrón. Esta última fue descubierta en 1932 por James Chadwick, un estrecho colaborador de Rutherford. Paulatinamente, el sistema planetario del átomo, tal como lo había diseñado su maestro, comenzó a complicarse con esta ininterrumpida proliferación de nuevas partículas. A su vez, John Cockcroft y Ernest Walton comenzaron en 1933 a disparar protones acelerados a distintos materiales por medio de dispositivos de alto voltaje, inaugurándose la época de los aceleradores de partículas. También



*Fig. 3.18. Dispositivo de disparo automático de fotografías al paso de las partículas por la cámara de niebla. Blackett and Occhialini. 1932.*



*Fig. 3.19. Patrón para interpretar los trazos de las fotografías de la cámara de niebla. Del Atlas de Gentner, W; y Leibnitz. W. B. 1940.*

rompecabezas que era necesario descifrar. Líneas rectas y circulares, divisiones en dos o más trazos, dispersión en haces múltiples, declinaciones, interrupciones imprevistas, cambios de sentido, se convirtieron en signos identificativos de cada una de las partículas, así como del signo de sus cargas o de sus transformaciones. En muchos casos, el objetivo más ansiado por los científicos era el descubrimiento de una nueva partícula, como el de las bautizadas V, por Clifford C. Butler y George Rochester en 1946, tras arduos trabajos de análisis de las imágenes obtenidas (Figura 3.20.).

La cámara de niebla siguió experimentando nuevas transformaciones a lo largo de los años<sup>48</sup>, hasta ser superada por otros tipos de cámaras, como la de burbujas y la de destellos, o por los propios aceleradores de partículas. La cámara de niebla, conjuntamente con las emulsiones nucleares (una técnica fotográfica determinante en el avance de la física atómica durante gran parte del siglo pasado), conformó un modelo de

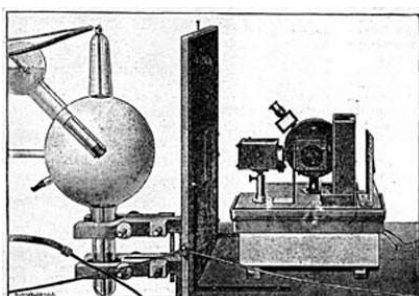


*Fig. 3.20. C. Butler trabajando con el proyector de fotografías hechas con la cámara de niebla. G. Rochester.*

actuación en ciencia muy dependiente de la imagen, en este caso, de la proporcionada por la fotografía de las sales de plata.

### 3.6. La difracción de rayos X

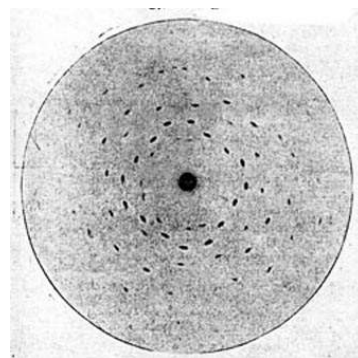
A medida que la presencia de nuevos fenómenos electromagnéticos se hizo más ostensible más allá del espectro visible ( rayos ultravioleta, rayos X, emanaciones radiactivas, rayos cósmicos), fue creciendo el interés por registrar de una forma visual sus manifestaciones y secretos. En este sentido, la fotografía pasó a ser el principal medio para conseguir estos fines en las primeras décadas del siglo XX. Los rayos ultravioleta fueron detectados en 1801 por J. W. Ritter,



*Fig. 3.21. Aparato de Friedrich y Laue para fotografiar el efecto de los rayos X a través de los cristales. 1913.*

utilizando un procedimiento muy próximo a la fotografía. Este consistió, básicamente, en impregnar un papel absorbente con cloruro de plata y colocarlo en una cámara oscura donde era expuesto<sup>49</sup>. Sin embargo, no fue hasta que R. Küch inventó la lámpara de cuarzo en 1906, que fue posible desarrollar una técnica más depurada de fotografía ultravioleta. La entrada en escena de los rayos X suscitó un interés aún mayor por esta línea de investigación, pues se pensó que la mínima longitud de sus ondas podría ser utilizada para generar nuevos métodos de observación microscópica. Estas circunstancias impulsaron a Max von Laue, experto en el estudio de la dispersión de la luz en los cristales, a utilizar los rayos X como fuente de radiación para el análisis de este tipo de materiales. En 1912, preparó un

procedimiento experimental que le permitió constatar el fenómeno de la difracción de estos rayos al ser proyectados sobre moléculas de cristales. El descubrimiento suscitó una gran expectación, al confirmarse que se producía un efecto de interferencia en la propagación de estos rayos, hecho decisivo que reavivó las tesis defensoras del comportamiento ondulatorio de la luz. El montaje consistió en la producción de un rayo X en el interior de un tubo de vacío, que se hacía pasar por un pequeño orificio emplazado en una placa de plomo (Figura 3.21.). Esta medida posibilitó que la radiación impactara de forma directa contra una pequeña pieza de cristal de zinc-blenda, de un centímetro cuadrado y de 0,5 mm de espesor. Una vez que el rayo traspasó dicho cristal, fue recibido en una placa fotográfica. Tras ser revelada, se comprobó que mostraba un patrón de puntos de más o menos densidad, caracterizado por una mancha central oscura y difuminada, y una serie de marcas repartidas de forma geométrica a su alrededor (Figura 3.22). Se tomaron fotografías a distintas distancias, observándose que la posición de los puntos negros no obedecía a una distribución arbitraria, sino que respondía a una estructura bien definida, presente en el interior de lo más íntimo del cristal bombardeado. Pronto se dedujo que el carácter de los rayos desviados por el cristal era el de los propios rayos X emitidos que habían sido cambiados de ruta por los planos dispuestos en diferentes posiciones angulares en el interior del cristal; es decir, por los planos que configuran la estructura atómica del cristal<sup>50</sup>. El análisis pormenorizado de los puntos negros aparecidos en las fotografías, se asemejó al trabajo detectivesco que a



*Fig. 3.22. Efecto fotográfico del paso de rayos X a través de un cristal de zinc blenda. Max von Laue. 1912.*

partir de ir uniendo detalles ínfimos y aparentemente anodinos, descubre la razón de ser de un misterio.

*En otras palabras, lo que revelan las fotografías no es la disposición estereográfica de los átomos elementales, sino el entramado de base al que se llega tomando los átomos de un mismo elemento químico situados de forma similar (o idéntica) a lo largo de toda la estructura.*<sup>51</sup>

Esta técnica hizo posible el reconocimiento de la simetría de un cuerpo, y su proyección en un espacio de dos dimensiones, que fácilmente puede ser llevado a tres con el uso de técnicas estereoscópicas. La aparente naturaleza ondulatoria de esta radiación, y la relación entre las marcas de las fotografías y la estructura atómica del cristal, quedaron mejor explicadas posteriormente por W. L. Bragg, quien especificó que la longitud de onda de los rayos X era tan pequeña que, en realidad, les hacía comportarse como partículas, ya que la amplitud de las ondas es menor que el tamaño del átomo en el que se produce la reflexión. En otras palabras, la disposición regular de las moléculas de los cristales actúa como una verdadera rejilla de difracción ante estos rayos (Figura 3.23.). Consecuentemente, a partir de este descubrimiento, no se hizo esperar un trabajo de catalogación exhaustiva de las sustancias a partir de su estructura cristalográfica, puesto que era fácil determinar la composición química de éstas a partir de los elementos geométricos presentes y observados en ella.

*“El sistema de clasificación adoptado en este catálogo está basado en los valores de cinco ángulos fundamentales que, en general, caracterizan a los cristales de cualquier sustancia dada”.*<sup>52</sup>

El aparato ideado por Laue estaba encerrado en una caja hermética para evitar la acción perturbadora de la luz exterior. Los puntos oscuros en las placas, reflejo del entramado atómico del cristal, se conseguían con tiempos de exposición muy prolongados, que podían ir desde una a veinte horas, ya que las emulsiones fotográficas de la época eran poco sensibles a la acción de los rayos X.

Una vez más, las técnicas de observación basadas en la fotografía confirmaron intuiciones teóricas que se venían postulando desde hacía años; se trataba, en verdad, de la primera vez que la teoría atómica de Dalton, formulada a principios del s. XIX, se hacía visible. Siguiendo la línea de pensamiento de Bragg, que afirmaba que *la cristalografía es la ciencia que concierne la naturaleza de las cosas*<sup>53</sup>, debido a que la mayor parte de la materia sólida está compuesta de cristales, no es de extrañar que esta técnica haya sido clave en descubrimientos vitales para la historia de la ciencia. Así lo confirman los trabajos de Kathleen Lonsdale, que hicieron posible el descubrimiento de la estructura del benceno; los de Rosalind Franklin, con sus espléndidas fotografías, base del descubrimiento de la estructura del ADN; o los de Linus Pauling, creador de la química estructural moderna, para la que fue determinante la identificación previa, mediante esta técnica, de

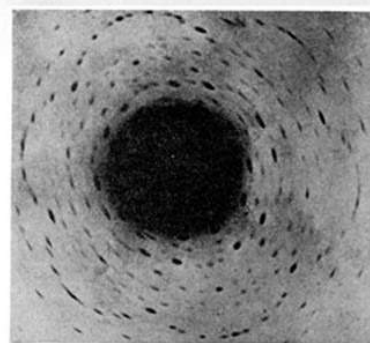


Fig. 28.—Diffraction of X-Rays by a Crystal of Beryl  
(From *X-Rays and Crystal Structure*, Sir W. H. and W. L. Bragg)

**Fig. 3.23. Difracción de los rayos X por un cristal de Berilo. De: "X- rays and Crystal Structure". W. H y W. L. Bragg. 1920,s.**



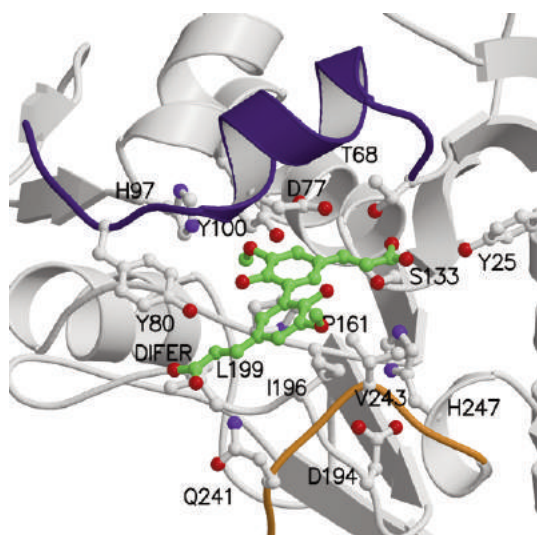


Fig. 3.24. Imagen de síntesis de una proteína. 2005. CSIC.

estructuras tan importantes como la del cloruro sódico, del diamante - en este caso, a manos del propio Bragg<sup>54</sup>-, de los silicatos, la penicilina, o la vitamina B 12.<sup>55</sup> Hay que reconocer en este contexto, la ayuda prestada por otras técnicas muy próximas a la difracción de rayos X, como son la difracción de electrones y de neutrones. Las aplicaciones del conjunto de estas técnicas han trascendido el ámbito de la química orgánica y de la bioquímica, para adentrarse en el estudio de los materiales sintéticos, como gomas y polietilenos, o en el de la química de los silicatos y de otros sólidos inorgánicos.

Un aspecto a destacar en la actual técnica de difracción de rayos X es la incorporación de las técnicas electrónicas de producción de imágenes, que han

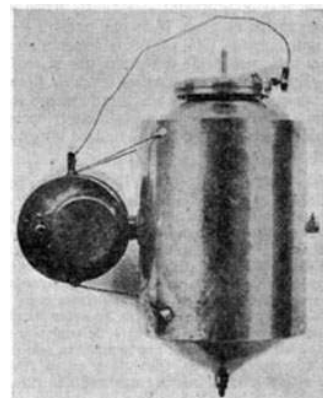
venido a unirse a las fotográficas convencionales; y el hecho de que la recombinación de los haces difractados se lleve a cabo en nuestros días por procedimientos matemáticos (Series de Fourier), con la ayuda de ordenadores. Este reagrupamiento se encarga de reconstruir de manera artificial, la información relativa a las fases de las ondas, dado que no están presentes en las imágenes resultantes y, por tanto, imposible de medir directamente. En otras palabras, tienen que *ser derivadas, deducidas, imaginadas o medidas indirectamente, a fin de conseguirse una imagen aproximada de la materia dispersada*<sup>56</sup>. Esta limitación se debe fundamentalmente a que la dispersión de los rayos X no puede ser llevada a un punto de foco, por no existir hasta el momento ningún dispositivo electromagnético u óptico que permita hacerlo. Cuando los responsables del Dpto. de Cristalografía del CSIC aseguraron a este autor que las imágenes simuladas de las estructuras moleculares, tan en boga hoy día en el campo de la investigación bioquímica (Figura 3.24.), son tan *reales* como cualquier imagen fotográfica de medios tonos, presente en cualquier periódico o revista, se suscitó una discusión muy fructífera acerca del elemento analógico de las imágenes, y del valor, sentido y utilidad que tienen en la sociedad y en la ciencia de nuestros días.

### 3.7. Los rayos cósmicos

La incursión de la ciencia en el mundo atómico a través de la fotografía, no se circunscribe al uso de las radiaciones electromagnéticas creadas en los laboratorios. Pronto se verificó la existencia de los rayos cósmicos, una nueva fuente de radiaciones, más allá de los rayos gamma, que superaba con creces la intensidad y penetrabilidad de cualquier forma de producción artificial de las mismas, y cuya procedencia debía estar en los confines del universo. Las primeras intuiciones sobre la existencia de este tipo de radiaciones se deben a S. M. McLennan, E. Rutherford y su equipo de colaboradores cuando comprobaron que las mediciones hechas con el electroscope ofrecían resultados menores si el aparato era rodeado por varias capas densas de un material aislante como el plomo. Este sorprendente fenómeno les llevó a postular la existencia de una *radiación penetrante*, tal como la denominaron en un principio, procedente de la atmósfera, y que era capaz de vencer ese tipo de aislamiento y producir ligeras variaciones en el instrumento<sup>57</sup>. En 1910, el suizo A. Gockel encontró estas nuevas radiaciones tras lanzar globos al espacio a una altitud de 4.500 metros, equipados



de un pequeño electroscopio. Este hallazgo despertó el interés de la comunidad científica por este tipo de fenómeno, pues hasta entonces se pensaba que no existían otras radiaciones más penetrantes que las provenientes de los elementos radiactivos. Estas experiencias se vieron confirmadas por el lanzamiento de nuevos globos en 1912, a cargo de Victor F. Hess, y por Kol-hörster en 1914, con los que se comprobó que la intensidad de estas radiaciones aumentaba significativamente con la altura de las mediciones. Terminada la I Guerra Mundial, se reanudaron las investigaciones en este campo, esta vez, en San Antonio, Texas, donde en 1922, los científicos Bowen y Millikan<sup>58</sup> lanzaron globos sonda a 15.500 metros de altitud con un instrumental más completo. En esta ocasión, los equipos consistieron en electroscopios automáticos, barómetros, termómetros y un dispositivo fotográfico muy simple provisto de una ranura de 0,0025 cm. de ancho, que permitía registrar sobre una película diminuta las radiaciones de la luz solar en forma de sombras (imágenes de difracción). Para hacernos una idea de la simpleza, pero a la vez de la precisión e ingeniosidad de esta instrumentación, basta decir que el conjunto de todos estos aparatos, incluido el dispositivo fotográfico, no llegaba a pesar más de 210 gramos (Figura 3.25). Los globos permanecieron en el espacio durante más de tres horas y fueron recogidos a 160 kilómetros del lugar de lanzamiento.

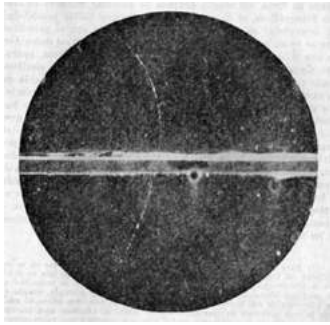


*Fig. 3.25. Instrumentación para la observación de rayos cósmicos. La película se encuentra en el dispositivo de la izquierda. Kelly Field. 1922.*

El siguiente reto que se presentó a estos investigadores, tras comprobarse fehacientemente la existencia de estas radiaciones cósmicas, fue determinar su fuerza de penetración. Teniendo en cuenta que las pruebas realizadas hasta la fecha con radiaciones conocidas del tipo radiactivo, habían demostrado que su poder de penetración en el agua llegaba hasta los dos metros, se decidió realizar experimentos en esta dirección. De manera que Millikan, acompañado de su grupo de investigadores, subió a finales de 1922 al lago Muir, en California, situado a 4.000 metros de altura. Una vez allí, sumergieron el equipo de medición hasta 15 metros de profundidad en las aguas heladas, provenientes del deshielo de las cumbres. Para sorpresa de todos, detectaron radiaciones cósmicas en aquellas profundidades que confirmaban su procedencia no terrestre, y un poder de penetración dieciocho veces mayor que el de las radiaciones gamma, consideradas las más penetrantes hasta el momento. Mediciones posteriores realizadas en otros lagos situados a alturas similares, demostraron que las capas atmosféricas no incidían en la fuerza de penetración de estos rayos.

*“Se deduce que en el universo existe mucha más energía en forma de rayos cósmicos que en forma de calor y luz. En base a las estimaciones astronómicas de la distribución de las nebulosas llegamos a la conclusión de que la energía radiante total en el universo que existe bajo la forma de rayos cósmicos es de 30 a 300 veces mayor que la que existe bajo todas las demás formas de energía radiante en conjunto”.<sup>59</sup>*

El estudio de los rayos cósmicos abrió un nuevo campo de exploración en la ciencia. A partir de estas primeras experiencias, comenzaron a realizarse multitud de estudios a cargo de investigadores repartidos por todo el mundo. Pronto constataron la uniformidad de distribución de esta radiación en el conjunto de la bóveda celeste, así como la escasa incidencia de la acción del sol o de las capas



**Fig. 3.26. Positrón (Electrón positivo) 1932. Carl D. Anderson.**

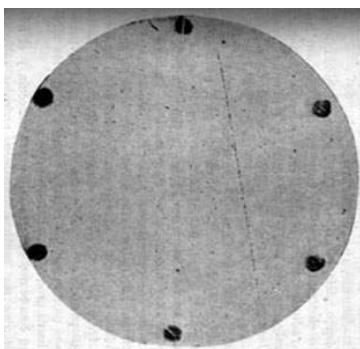
atmosféricas sobre ella, lo que hizo pensar que no existía una variación apreciable de su efecto entre el día y la noche. Años más tarde, mediciones realizadas en Sudamérica (1928), fuera del campo de acción de la Vía Láctea, demostraron que las radiaciones debían proceder de algún punto fuera de nuestra galaxia, por lo que la suposición de que una fuente continua de radiaciones provenientes de un lugar remoto del universo, que caen sobre nuestras cabezas como una lluvia constante de partículas, se hizo cada vez más plausible. El análisis espectroscópico se llevó a cabo también en grandes profundidades y en altitudes superiores a los 10.000 metros con la ayuda de aeroplanos, obteniéndose espectros en forma de bandas que ayudaron con el tiempo a determinar la naturaleza de

estos rayos.

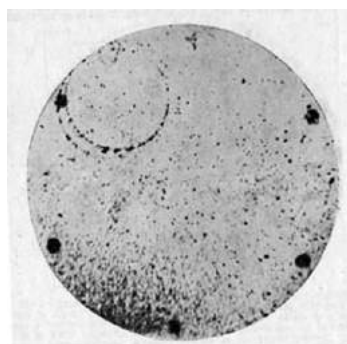
La acumulación de mediciones y de fotografías obtenidas a partir del estudio de los rayos cósmicos se vio coronada por el descubrimiento, en este tipo de radiaciones, de una nueva partícula subatómica, cuya existencia fue augurada de forma teórica unos años antes: el electrón positivo o *positrón*. Nuevamente, fue la fotografía la encargada de añadir una nueva partícula a la lista de las entonces conocidas: el electrón y el protón, con una placa tomada en 1932 (Figura 3.26).

*“Carl D. Anderson había tomado la fotografía y reveló la placa. De inmediato advirtió su importancia y en compañía de Seth Neddermeyer pasó la noche entera tratando en vano de encontrar un modo de interpretarla que dejase a salvo el antiguo punto de vista ¡Imposible lograrlo! La fotografía ponía de manifiesto de forma que no dejaba lugar a dudas el trazo de un electrón positivo libre, que poseía exactamente las propiedades de un electrón negativo libre, a excepción del signo de la carga, y nada de las propiedades de un protón.”<sup>60</sup>*

Las fotografías fueron hechas por Millikan y Anderson con la ayuda de una cámara de niebla que construyeron para la ocasión, y con la ayuda de generadores de electricidad de altísima potencia que corroboraron la presencia de rayos



**Fig. 3.27. Electrón negativo o partícula beta liberada por un rayo cósmico. Norman Bridge Lab. de Pasadena.**



**Fig. 3.28. Trazo de un electrón de rayos cósmicos, registrado con cámara de niebla vertical. R. A. Millikan. 1929.**



**Fig. 3.29. Fotografía del trazo de un electrón (izq.) y de un protón (dcha), procedentes de rayos cósmicos al golpear un núcleo atómico. R. A. Millikan. 1931.**

cósmicos (Figura 3.27 y 3.28). La acción de éstos sobre los núcleos de los átomos formaron un doble trazo (Figura 3.29), que ponía en evidencia la existencia de un electrón negativo junto a otro positivo. Un dato de sumo interés en este descubrimiento, que pone de manifiesto hasta qué punto las observaciones pueden marcar el curso y el progreso de la ciencia, fue el hecho de que estos investigadores atribuyeron en un primer momento el doble trazo de las partículas a la presencia de un electrón y de un protón, algo lógico de pensar, puesto que éstas eran las únicas partículas conocidas hasta entonces, y las únicas integrantes del esquema teórico relativo a la estructura del átomo. Sin embargo, el análisis concienzudo y pormenorizado durante meses de estos dos investigadores, puso de manifiesto que no podía tratarse de un protón, sino de una nueva partícula de carga positiva, equivalente al electrón, tal como quedó patente en las dimensiones de su trazo recogido por las placas fotográficas. A partir de ese año, la cadena de descubrimientos de nuevas partículas subatómicas fue imparable, actividad que llega hasta nuestros días y que no presenta señales de remisión. Desde el aislamiento del electrón, primera partícula subatómica detectada, la lista ha ido incrementándose hasta límites insospechados: fotones, neutrones, protones, positrones, muones, piones, partículas *W* y *Z*, hadrones, quarks, gluones, gravitones, etc. Se trata de pasos concienzudos de la ciencia, dirigidos a desvelar la estructura íntima de la materia y de la luz, en un afán por encontrar las unidades mínimas que gobiernan la naturaleza.

### 3.8. El espectrógrafo de masas

El descubrimiento de la radioactividad permitió a un científico tan avisado como J. J Thomson, comprobar en 1897, que algunos elementos no radiactivos, por ejemplo el plomo, al ser asociados con otros que sí lo son, adquieren las propiedades radiactivas de éstos, aún incluso cuando son retirados de su presencia. De este hecho, dedujo que existían elementos en la naturaleza que tienen un mismo comportamiento químico, pero diferente comportamiento radiactivo. Esto despertó, a su vez, la sospecha de que existían átomos de igual carga, pero de diferente peso atómico. Esta idea estaba en consonancia con otra de William Crookes, formulada unos años antes, que venía a decir que las mediciones que los químicos venían haciendo de los pesos atómicos por medios electrolíticos, eran indicativas del valor medio, relativo a diferentes átomos de un mismo elemento. Fue Thomson el primero en aportar pruebas experimentales en esta dirección, y en extender este hallazgo al resto de los elementos, más allá de los estrictamente radioactivos. Para ello, se basó en el estudio de los rayos positivos, rayos que se producen en el interior de los tubos de vacío, y que se diferencian de los electrones, por presentar cargas positivas muy intensas. El método empleado consistió en desviar la trayectoria de estos rayos por medio de campos eléctricos y magnéticos emplazados a su paso, y en medir las posiciones de los haces a su llegada al extremo fluorescente del tubo con la ayuda del registro fotográfico de estos puntos luminosos (ver Figura 2.59). Eugen Goldstein, conocido mayormente por proponer en 1886 el nombre de *rayos catódicos* para los haces de electrones producidos en los tubos de vacío, fue el primero en llamar la atención sobre la existencia de estos rayos formados por partículas positivas, a los que denominó en su día *rayos canal*. En 1897, Wilhelm Wien dio una interpretación más aproximada sobre el origen y formación de estas radiaciones, confirmando que se trataba en realidad de átomos o moléculas ionizados del gas presente en el interior del tubo. Estos se cargaban positivamente al desprenderse de sus electrones periféricos por la acción del rayo catódico en su trayectoria del cátodo al ánodo. Fue el propio Thomson quien proporcionó una explicación más completa de la naturaleza de estos rayos, al incorporar gases a baja presión en el interior del tubo, procedimiento que le permitió un mayor control de las colisiones entre las





**Fig. 3.30. J. J. Thomson en el laboratorio Cavendish. 1903.**

partículas, y medir con mayor precisión las relaciones entre las cargas y los pesos de estas moléculas. Thomson no pudo confirmar hasta 1913, que los rayos canal formados en gas neón, presentan dos valores distintos en la relación carga/ masa, lo que significa que sus cargas son iguales pero que sus pesos varían en dos unidades. Con esto se confirmó la existencia de los *isótopos*, un término acuñado por Frederick Soddy en 1910, que significa literalmente en el *mismo lugar*, en este caso, de la tabla periódica. Los resultados se aplicaron al resto de los elementos no radioactivos, corroborando las primeras intuiciones de Crookes sobre los valores

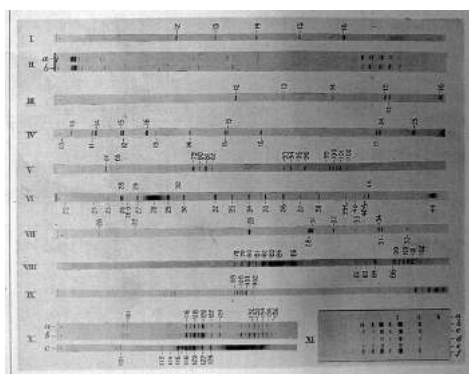
medios de los pesos atómicos<sup>61</sup> (Figura 3.30).

Tras la primera guerra mundial, los trabajos se reanudaron en esta dirección con la aparición del primer espectrógrafo de masas. Este instrumento vino a reforzar la alianza entre fotografía y electromagnetismo, dando lugar a uno de los instrumentos claves de la historia de la ciencia del siglo XX. Fue construido en 1919 por Francis Aston (1877- 1945), un ayudante de J. J. Thomson. El mérito de Aston consistió en perfeccionar el método utilizado por su maestro, fabricando un aparato en el que quedaban recogidos fotográficamente los puntos de llegada de las radiaciones, una vez que atravesaban un determinado gas en el tubo, y tras ser desviados de sus trayectorias por campos eléctricos y magnéticos fijados de antemano (Figura 3.31). Las pequeñas marcas aparecidas en las emulsiones eran un fiel reflejo de las partículas presentes en el gas, una vez que éste había experimentado un proceso de ionización, y de sus respectivas masas. La trayectoria de los haces de electrones son desviadas, en mayor o menor medida, dependiendo de las condiciones de vacío en las que se encuentra la muestra y de la presencia de campos eléctricos y magnéticos situados a su paso. El final de sus trayectorias queda convenientemente registrado en placas fotográficas, tercer elemento clave en todo espectrógrafo de masas. En la actualidad, la forma de registro es mediante



**Fig. 3.31. Aston con su tercer espectrógrafo de masas.**

dispositivos electrográficos, o simplemente mediante la visualización de los resultados en pantalla de ordenador, que a su vez pueden ser llevados a impresora. En este contexto, las marcas fotográficas de distintas densidades han sido sustituidas por la representación gráfica, lo que obligó durante una serie de años transitorios, a establecer una distinción entre espectrógrafos y espectrómetros, dependiendo de la técnica utilizada (Figura 3.32).



**Fig. 3.32. Espectrografía de masas de Aston, 1919.**

Aston pudo identificar de inmediato con la ayuda de su espectrógrafo la existencia de nuevos isótopos, la mayoría de ellos pertenecientes a elementos no radiactivos,



como el cloro, el silicio, el azufre o el mismo neón, en el que encontró un tercero. Con este nuevo instrumento se comprobó de forma fehaciente que los pesos atómicos barajados hasta entonces correspondían en realidad a valores medios, y que esa era la causa de que existieran pesos atómicos que no resultaban ser números enteros. Los procedimientos químicos utilizados hasta entonces en estas tareas, eran incapaces de hacer una separación de este tipo entre los diferentes isótopos de un mismo elemento. A partir de ese momento, la nueva catalogación de los elementos se estableció en base a sus cargas y no a sus pesos como se venía haciendo hasta entonces. En la actualidad, el nivel de conocimiento en torno a estas cuestiones se ha perfilado aún más, especialmente a partir de la determinación de las partículas presentes tanto en el núcleo atómico como en su periferia. Los protones, o cargas positivas del núcleo, son las que deciden la carga general del átomo, siendo la mayor o menor presencia de neutrones, partículas también presentes en el núcleo, el elemento decisivo para determinar la existencia de los diferentes isótopos de un mismo elemento. La primera separación de un isótopo de un elemento, respecto de los otros, se llevó a cabo por Harold Urey en 1932, con la obtención de agua pesada. La siguiente fue la separación del isótopo 235 del uranio, a partir del  $^{238}\text{U}$ , realizada dentro del proyecto Manhattan, para la construcción de la primera bomba atómica. Las investigaciones llevadas a cabo por Thomson, Wien y Aston durante todos estos años, basadas en el método de la desviación magnética de las radiaciones, fueron decisivas en esta hazaña científico- bélica<sup>62</sup>.

### 3.9. La fotografía en la revolución cuántica y relativista

Hay que reconocer que la inmersión en cualquier materia de estudio siempre arrastra al investigador a sobreestimar la importancia de los fenómenos tratados en favor de las tesis defendidas. En mi caso, debo admitir que me resulta difícil restar trascendencia al papel desempeñado por la fotografía y la imagen tecnológica en general en la adquisición de conocimiento científico en los dos últimos siglos. A medida que se visita la trastienda de los pequeños y grandes descubrimientos científicos, y se emprende la tarea de rebuscar entre un vasto cúmulo de datos, referencias y explicaciones, información relativa a las técnicas de observación utilizadas, surge en la mayoría de los casos la sorpresa de toparse uno con la imagen, como elemento fundamental del proceso. De una forma u otra, la imagen se convierte en una fuente de luz para la intuición del sabio, o en una herramienta imprescindible para la confirmación o refutación de lo que se tenía por cierto. Me atrevería a decir, como resultado de esta labor de criba documental llevada a cabo con la literatura científica, que acompaña estas páginas, tanto teórica como experimental, que un gran número de científicos se muestra ajeno a este hecho, tal como se pone de manifiesto en la escasa atención que sus escritos prestan a la definición exhaustiva de los métodos de observación implicados, o a las breves pinceladas que les otorgan. Si los más experimentales suelen darlo por hecho, y lo entienden como una parte más del procedimiento, los más teóricos, suelen tratarlo en abstracto, o simplemente lo relegan al olvido. La labor de entresacar los datos relevantes respecto de los métodos de observación empleados, y en especial de los fotográficos entre sugerencias vagas, referencias a otros escritos, notas insinuadas, o descripciones truncadas, ha sido verdaderamente ardua. Una de las áreas donde se ha producido este *descuido* es, a mi entender, en el ámbito de la revolución científica que se produjo a principios del siglo XX, a raíz de la formulación de las tesis de la mecánica cuántica y de la relatividad. De nada ha servido, que la dicotomía observación- especulación, o de experiencia- teoría, haya marcado el rumbo y el destino de estas dos grandes aportaciones de la ciencia del siglo XX. Los comentarios sobre el papel desempeñado por la imagen tecnológica en la formación de estas dos teorías han permanecido siempre en los alrededores de

las grandes discusiones, centradas en la vieja polémica entre idealistas y materialistas. En favor de las opiniones esgrimidas en estas páginas, se levanta una realidad iconográfica omnipresente que crece por días sin señales de remisión, y que nos obliga a mirar hacia atrás en la historia para otorgarle su verdadero valor y dimensión. Lo que sí es cierto es que los productos de la observación en general, y los que proporcionan los instrumentos de adquisición, registro y reproducción de imágenes, entre ellos la fotografía, han sido reclamados en numerosas ocasiones, con un sentido u otro, en defensa de estas posiciones antagónicas. Unos, para declarar que lo sensorial y mensurable son los dos grandes pilares sobre los que se levanta el método experimental; los otros, para relativizar la información que proporcionan, y para integrarla en sistemas teóricos, únicos garantes de su valor y sentido. De una forma u otra, lo fundamental, en este caso, es resaltar la importancia que tienen las imágenes por sí mismas, y rescatarlas de su anonimato y olvido en el contexto de la investigación científica. Luego, cada uno establecerá sus propias conclusiones, de acuerdo con sus convicciones y preferencias.

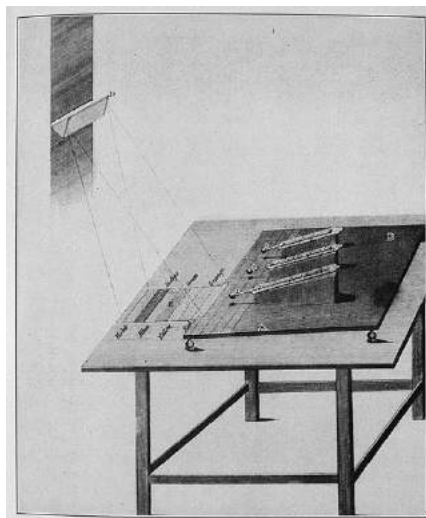
A lo largo de estas páginas, hemos asistido a la exposición de hitos decisivos de la historia de la ciencia en los que la fotografía ha sido parte interviniente. El propio descubrimiento del proceso fotográfico, completado con la aparición del primer fijador de las imágenes latentes en las emulsiones es, en sí mismo, un hito histórico. La mayoría de los instrumentos de observación utilizados hasta entonces entraron con este descubrimiento en una nueva dimensión, sin parangón en los años de sus desarrollos anteriores. A partir de la invención de la fotografía, tanto la observación astronómica como la microscópica, se vieron notablemente impulsadas para iniciar una nueva fase de crecimiento. Y la asociación de la fotografía con el electromagnetismo, uno de los objetivos centrales de esta investigación, comenzó a proporcionar a la ciencia una serie de técnicas de visualización fundamentales para el desarrollo científico. Las más nombradas hasta ahora, los rayos X, la radioactividad, la difracción de electrones, neutrones y de rayos X, la espectrografía de masas, o la cámara de niebla, representan sólo el principio de una larga y fructífera trayectoria que llega hasta nuestros días. Entre ellas, cabe destacar para los fines de este capítulo la espectrografía, dado el importante papel que ha desempeñado en la adquisición de conocimiento científico, y en las dos grandes teorías de la física del siglo XX: la relatividad y la mecánica cuántica.

### **3.10. La espectroscopía óptica**

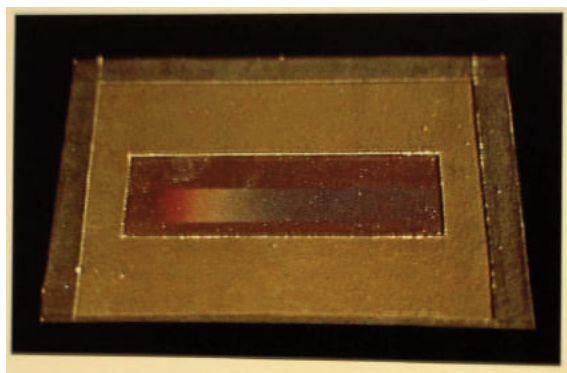
En un principio, la espectrografía nació en el momento que la fotografía fue aplicada al análisis espectroscópico, o lo que es lo mismo, una vez que las cámaras fotográficas fueron acopladas al anteojo del espectroscopio con la finalidad de poder fijar las imágenes observadas. Con el paso del tiempo, la espectrografía pasó a significar cualquier forma de representación gráfica, fruto del análisis espectroscópico de una fuente electromagnética. Los términos espectroscopía, espectrometría, espectrograma o espectrografía se entrecruzan, originando cierta confusión en la literatura científica. Dado que en la actualidad, gran parte de la espectrografía viene presentada en forma de gráficos bidimensionales, el sentido fotográfico del término ha pasado a ocupar un puesto de menor relevancia, cuando no ha llegado a su práctica desaparición. Este es el principal motivo por el que se crea un campo semántico de escasa delimitación que es necesario dilucidar. La confusión se acentúa, más si cabe, cuando vemos que en la actualidad, la representación espectrográfica ha abandonado el uso de la fotografía de las sales de plata en la mayoría de sus prácticas en favor de representaciones gráficas generadas por ordenador. En mi opinión, y como

resultado del estudio emprendido en estas mismas páginas sobre las técnicas electrográficas y electrofotográficas (Véase Cap. 2.7), no estaría de más proponer el establecimiento de una distinción entre los términos de *espectrografía* y *espectrofotografía*, en consonancia con las conclusiones a las que se llegaron en aquel capítulo. Sin embargo, mantengo el término espectrografía para designar tanto unas como otras dado el carácter histórico de esta investigación, y por no contradecir el uso que los científicos han dado tradicionalmente a esta palabra.

La espectroscopía se desarrolla fundamentalmente a principios del siglo XIX, a partir del interés general suscitado por el estudio de la composición del espectro visible, y por el descubrimiento de una serie de radiaciones hasta entonces fuera del alcance de la visión humana<sup>63</sup>. Es costumbre afirmar que fueron los estudios de Newton sobre la dispersión de la luz a través de los prismas, los que abrieron el camino a la creación de la espectroscopía; sin embargo, un antecedente más directo de la espectrografía como tal, lo encontramos en los trabajos que Carl W. Scheele llevó a cabo en 1777 sobre los efectos de la luz en las sales de plata. Con estos experimentos se constató que los efectos de la luz son más acentuados en este tipo de sales a medida que nos acercamos a la franja más próxima al color violeta. No transcurrieron muchos años, cuando se detectó la existencia de radiaciones más allá de este color. Recordemos que en 1801, J. W. Ritter identificó los rayos ultravioleta, utilizando una cámara oscura y papeles impregnados con este mismo tipo de sales. Y que unos años antes, el astrónomo William Herschel (1738- 1822), caminó por el espectro en sentido contrario, comprobando el aumento de temperatura que se produce a medida que nos acercamos a luces de longitudes de onda mayores que el rojo, hecho que condujo al descubrimiento del infrarrojo (Figura 3.33). Estos hallazgos tan importantes se vieron culminados con los estudios de Johann T. Seebeck, quien siguiendo las enseñanzas del propio Goethe sobre el color, comprobó hacia 1810 cómo el espectro solar quedaba recogido con todos sus colores en una superficie de papel bañada en cloruro de plata. Los métodos con que fueron observados estos fenómenos relativos al espectro, nos dan una idea de lo cerca que se estaba del descubrimiento del procedimiento fotográfico tal como lo conocemos en la actualidad.

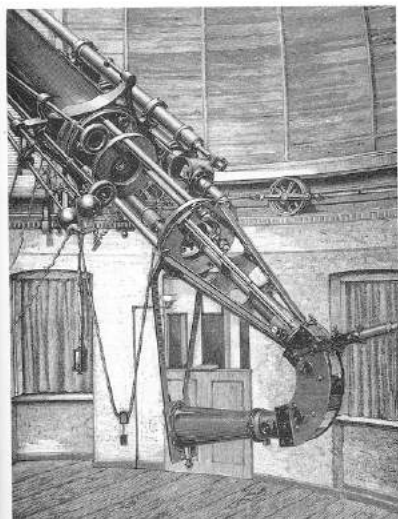


*Fig. 3.33. Estudios espectroscópicos de W. Herschel para la detección del IR. 1800.*



*Fig. 3.34. Fotografía del espectro solar. Edmond Becquerel. Probablemente la fotografía en color más antigua de la historia. 1848*

El conjunto de estas investigaciones coincidió con el resurgimiento de las tesis ondulatorias sobre la propagación de la luz, esta vez de la mano de Thomas Young (1773- 1823), Agustin Fresnel (1788- 1827), William Wollaston (1766- 1828), y Joseph von Fraunhofer (1787- 1826) fundamentalmente. Los fenómenos de difracción y de interferencia, tal como se observan al hacer pasar la luz a través de ranuras finas, o en las sombras producidas por los objetos afilados y cortantes, fueron un reto para los científicos de la época. La invención de la cámara lúcida por



*Fig. 3.35. Espectrógrafo del observatorio de Postdam, con el que Vogel midió el desplazamiento hacia el rojo del espectro de Rigel y otras 51 estrellas.*

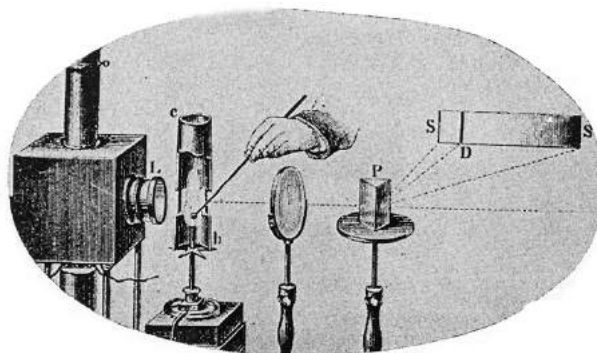
Wollaston, el uso de los prismas por Fraunhofer, o la utilización de la propia fotografía por Young para registrar los anillos de interferencia, fueron hechos precursores de la aparición del primer espectrógrafo. La detección de las líneas espectrales de *absorción* por Fraunhofer, y de *emisión* por John Herschel y el mismo Fox Talbot, dejaron constancia del papel decisivo que la fotografía iba a desempeñar en esta técnica. Las fotografías del espectro solar, hechas de forma independiente por John Herschel y Edmond Becquerel (Figura 3.34), auspiciaron un camino de investigación que culminó con las aportaciones fundamentales de Bunsen y Kirchhoff. En 1859, estos autores dieron una interpretación más exhaustiva de la producción de las líneas y bandas espectrales, relacionando los dos tipos de espectros conocidos, el de emisión y el de absorción. El descubrimiento experimental efectuado por Foucault en 1848, con el que se comprobó que una llama conteniendo sodio absorbe la luz amarilla producida por una lámpara de arco situada detrás de ella, fue determinante para el establecimiento de la ley de Kirchhoff sobre los espectros (Figura 3.35). Esta ley afirma que las energías de emisión y absorción de la luz de una determinada longitud de onda es siempre la misma para cuerpos que se encuentran a la misma temperatura. En otras palabras, un gas que irradia un determinado espectro a cierta temperatura, debe absorber las mismas líneas que emite. Lo que comenzó siendo una simple observación de los diferentes colores que conforman la luz blanca, tal como salió a relucir en el prisma de Newton, acabó por convertirse en un instrumento de alta precisión capaz de proporcionar información relativa a la composición de los elementos, ya sean átomos o estrellas, tan sólo con el análisis de las líneas de sombra que se forman a partir de las frecuencias de la radiación emitida por los cuerpos. El análisis espectroscópico se convirtió en un método exhaustivo para el análisis químico y físico, abriendo campos de exploración fundamentales en la ciencia. Relevancia especial cobró en astronomía y en química, áreas en las que posibilitó la formación de nuevas disciplinas de la importancia de la astrofísica y la espectroquímica, respectivamente. En pocos años, la espectroscopía se fue extendiendo al resto de las regiones del espectro, multiplicando ostensiblemente las posibilidades de estudio de los fenómenos físico-químicos.

*El estudio de la emisión y la absorción de los varios tipos de radiación en las diferentes regiones del espectro electromagnético debe ser considerado como la base del progreso del conjunto de toda la física, desde que se inició con el clásico experimento de Newton consistente en la descomposición de la luz blanca en sus colores constitutivos.*<sup>64</sup>

Esta extensión del análisis espectral a prácticamente todas las radiaciones del espectro electromagnético, desde los neutrones, rayos  $\gamma$ , o rayos X, a las microondas, ha obligado a establecer una distinción entre lo que se conoce como *espectroscopía óptica*, dedicada al espectro visible, IR y UV cercanos, y el resto de espectroscopías, pertenecientes a las demás fuentes de radiación (Figura 3.36). Tanto unas como otras, se fundamentan en el estudio de las líneas espectrales que se forman como resultado de la emisión y absorción de las radiaciones que se



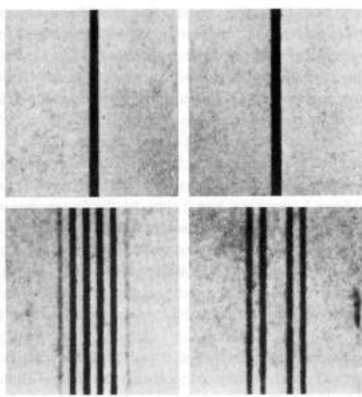
producen en los distintos cuerpos, ya sean galaxias remotas, gases, moléculas o átomos. Cada vez que se analiza la radiación procedente de un cuerpo, como puede ser la simple luz visible que desprende una llama, una chispa, un filamento incandescente, un gas irradiante, o una estrella; o cualquier tipo de radiación que escapa a nuestro sentidos, como la que procura un acelerador de partículas, la resonancia de un átomo, las microondas generadas por un astro o por los elementos constitutivos de una célula, etc., obtenemos información sobre su composición, sus elementos, su intensidad, su desplazamiento, su velocidad, su carga y peso. Para hacernos una idea del grado de refinamiento y precisión al que se puede llegar con esta técnica, pensemos por ejemplo, que las frecuencias o longitudes de onda pertenecientes a la franja de las microondas, y que emite el átomo de cesio, tal como son registradas por un espectroscopio, son utilizadas para determinar las unidades de tiempo actuales, entre otras razones, porque las vibraciones de los átomos ofrecen mayor estabilidad que las producidas por la rotación de la tierra y el movimiento de las estrellas<sup>65</sup>.



*Fig. 3.36. Montaje espectroscópico, cerca de 1870. La fuente de luz proporciona un espectro continuo a través de la lente condensadora y del prisma, a partir del sodio colocado en la llama, lo que produce una línea de absorción relativa al sodio.*

Tanto la teoría cuántica como la relatividad se fundamentan en una serie de observaciones y mediciones realizadas a lo largo de la segunda mitad del siglo XIX y primeras décadas del XX, en las que la espectrografía desempeñó un papel de primer orden. La teoría de Plank de los *quantos de acción*, que puede ser considerada de una forma grosera como la aplicación de las leyes de la termodinámica, y en especial de aquellas aplicadas en un último momento por Boltzmann, al campo de las radiaciones, se debe en gran medida al desarrollo de las técnicas espectroscópicas, y en particular a la visualización de las líneas espectrales procedentes de las numerosas placas fotográficas que por entonces comenzaron a revelarse, mostrando una serie de valores discretos y de saltos muy esclarecedores. Ejemplos de ello, son multitud de resultados experimentales ocurridos en los laboratorios de esta época, como el descubrimiento en 1885, a cargo de J.J. Balmer, de que la líneas del átomo de hidrógeno, conocidas posteriormente como líneas de Balmer, responden a una formulación matemática muy simple; o las experiencias fundamentales de Lummer y Pringsheim de 1897, comentadas anteriormente, sobre la interdependencia que se produce entre la intensidad de las radiaciones y las longitudes de onda, de clara incidencia en las teorías de Planck; o las relativas al efecto Stark, o desdoblamiento de las rayas espectrales por acción de campos magnéticos, detectado en 1913 por el físico alemán Johannes Stark (1874- 1957).

Por su parte, la formulación de la relatividad se debe en gran medida a la necesidad de encontrar una explicación integradora de una serie de fenómenos observados en la mayoría de los casos por técnicas espectroscópicas que contradecían los principios de la física clásica. Los fenómenos Zeeman, y Doppler-Fizeau, son un claro exponente de hasta qué punto las líneas espectrales recogidas en las placas condujeron a Einstein y otros científicos a la reformulación de las leyes explicativas del universo. Si a ello, añadimos las mediciones efectuadas por Michelson y Morley en 1887, por medio de su interferómetro, demostrando la inexistencia del éter, elemento considerado base para la



*Fig. 3.37. El efecto Zeeman  
Cuando un campo magnético  
divide las línea espectrales del  
sodio en varias líneas.*

propagación de las ondas electromagnéticas, comprobamos hasta qué punto la observación de nuevos fenómenos es un factor determinante a la hora de gestación de nuevas teorías (Figura 3. 37).

Recordemos que el efecto Zeeman consiste en que un rayo de luz sometido a la acción de un campo magnético sufre una desviación, puesta de manifiesto en una alteración de sus franjas espectrales. Esta alteración la detectó Zeeman en las líneas denominadas D, propias del sodio, normalmente finas y anaranjadas, y que por influencia del campo magnético se ensanchan de forma proporcional<sup>66</sup>, o incluso llegan a dividirse en varias. Este hallazgo comprometió los principios de la teoría ondulatoria de la luz, ya que su manifestación era indicativa de que la propia luz estaba compuesta de corpúsculos electrificados que cambiaban de comportamiento bajo

el efecto del magnetismo<sup>67</sup>, al tiempo que supuso un punto de reflexión determinante en científicos como Lorentz o Einstein. El primero utilizó la información provista por las líneas detectadas por Zeeman para deducir el valor de la relación carga/ masa de las partículas cargadas eléctricamente en los átomos, antes incluso del descubrimiento del electrón por Thomson, y de la formulación de los modelos atómicos de Rutherford y Bohr.<sup>68</sup> Y Einstein trasladó este fenómeno a una escala interplanetaria, poniendo a prueba su idea de que los rayos de luz provenientes de mercurio hacia la tierra, sufren una desviación por acción de la fuerza gravitacional del sol, hecho que se constató con las fotografías del eclipse de 1919<sup>69</sup>.

Por su parte, el efecto Doppler-Fizeau consiste básicamente, en que la energía radiante de un cuerpo y la frecuencia de sus radiaciones cambian según la velocidad relativa del cuerpo emisor respecto de un observador. Este hecho, que se detecta también con el espectroscopio, ofrece una información muy válida sobre la dirección del movimiento y las velocidades de las estrellas, ya que la frecuencia de las ondas de luz que vienen de los cuerpos celestes, se ve modificada dependiendo de la velocidad de éstos y de si están acercándose o alejándose, en este caso, de la tierra. Huelga exponer con más detalle en qué afectó este importante descubrimiento a las ideas que Einstein se forjó sobre el papel crucial que juegan las posiciones relativas de los observadores y de los sistemas de medición a la hora de determinar el comportamiento físico de un fenómeno.

Por último, el efecto Compton fue determinante a la hora de proporcionar una prueba experimental de la nueva teoría de Einstein sobre la doble naturaleza - ondulatoria y corpuscular- de la luz, y de su explicación del fenómeno fotoeléctrico, valedor del premio Nóbel de 1905. Este efecto, observado por Arthur Holly Compton (1892- 1962) en 1923, consiste en que los rayos X, al chocar contra la materia, se dispersan, perdiendo energía y adquiriendo a su vez mayor longitud de onda, hecho que vino a demostrar la existencia de partículas de luz, denominadas por Einstein fotones, cuyo comportamiento sería en forma de una onda corpuscular. Ya vimos en capítulos anteriores, cómo esta teoría dual, se vio completada años más tarde por Louis de Broglie. Este autor ofreció una explicación similar del comportamiento de los electrones, defendiendo esa misma dualidad en la materia, hecho que quedó confirmado por las fotografías de la difracción de electrones de Germer y Davidson del año 1927.

El impacto de la teoría cuántica en el seno de la ciencia no se hizo esperar. La

interpretación del fenómeno fotoeléctrico por Einstein a la luz de esta nueva teoría, dio un fuerte espaldarazo al trabajo de Max Planck, que se encontraba hasta entonces en una situación de cierta provisionalidad. En 1913, se produjo una nueva convulsión en la física atómica, a resultas de la detección del núcleo atómico, y de la aplicación de los principios de la teoría de Planck al esquema de interpretación del átomo. Niels Bohr observó que el modelo de Rutherford, único existente hasta ese momento, y creado a semejanza de un sistema planetario, no seguía las leyes de la mecánica instituida desde los tiempos de Galileo y Newton, ni tampoco las de la Electrodinámica, tal como habían quedado definidas por Maxwell. Esta situación puso de manifiesto que los principios generales de la física clásica no se ajustaban a la nueva imagen propuesta. Le faltaba estabilidad al modelo, por no poder ofrecer una explicación completa ni de la dinámica que presentan los electrones alrededor del núcleo, ni de la emisión y absorción de luz que se produce cuando los electrones saltan de una órbita a otra, tal como queda patente en las fotografías de las líneas espectrales. El modelo sugerido por Rutherford obligaría al sistema a contraerse y a desaparecer. Bohr, muy atento por entonces al desarrollo de la teoría cuántica de Planck y de la aplicación que de ella había hecho Einstein, pensó que si el modelo de átomo por él propuesto no seguía las leyes clásicas, tal como sucedía con el modelo de los *quantos*, lo más sensato sería establecer un puente de conexión entre ambos hechos. Con estas premisas, Bohr defendió que las leyes que gobiernan los espectros ópticos de los elementos podrían ser aplicadas, junto con la nueva teoría de los *quantos*, al modelo de átomo propuesto por Rutherford, maniobra que ayudaría a explicar su estabilidad y su comportamiento. Las teorías de Planck consiguieron de esta forma un respaldo definitivo en el seno del desarrollo científico.

*“El establecimiento de relaciones más íntimas entre el modelo atómico de Rutherford y los datos espectrales planteaba sin duda intrincados problemas. Por una parte, la propia definición de la carga y masa del electrón y del núcleo descansaba por entero en un análisis de los fenómenos físicos hecho a base de los principios de la mecánica y del electromagnetismo clásicos. Por otra, el postulado cuántico que afirma que cualquier cambio en la energía intrínseca del átomo consiste en una transición completa entre dos estados estacionarios, excluía la posibilidad de explicar sobre principios clásicos los procesos radiactivos, o cualquier otra reacción basada en la estabilidad del átomo”.*<sup>70</sup>

Bohr estableció la medición de las cargas presentes en los núcleos atómicos, a partir de las longitudes de onda de la luz, en este caso de rayos X emitidos en el mismo momento de la entrada de un electrón en las órbitas más internas y próximas al núcleo. Estas consideraciones quedaron respaldadas por la creación de un cuerpo matemático, que dio origen en 1913 a la que sería denominada Mecánica Cuántica. Este mismo año, H. G. J. Moseley (1887- 1915), midió con gran precisión esas longitudes de onda de los rayos X mediante el análisis espectral, utilizando cristales para su difracción, hecho que sirvió para determinar gran número de cargas nucleares de distintos elementos. Este trabajo supuso un gran espaldarazo a las tesis de la nueva mecánica cuántica y a la nueva imagen que del universo atómico se había propuesto. La culminación de este año glorioso para la ciencia, se produjo cuando Einstein presentó la *teoría general de la relatividad* tras largos años de arduo trabajo. El nuevo universo atómico ideado por la mecánica cuántica, comenzó a ser precisado con nuevas aportaciones, tales como la de A. Sommerfeld, que propuso la utilización de *órbitas elípticas* y la dinámica relativista para dar cuenta de forma más precisa de la estructura de ciertos espectros; o las de S. Goudsmit y G. Uhlenbeck que defendieron, con estos

mismo fines, la existencia de un *spin* intrínseco al funcionamiento del electrón. Esta partícula no sería una simple depositaria de carga eléctrica, sino que funcionaría como un imán con un cierto momento magnético y un momento cinético, a semejanza de un cuerpo sólido que gira alrededor de su eje. Con ello, se pudieron explicar con mayor precisión el efecto Zeeman, las estructuras finas múltiples de los espectros ópticos y de rayos X y otra serie de fenómenos observados por medios espectroscópicos fundamentalmente<sup>71</sup>. La complejidad del universo atómico, a resultas de los numerosos datos experimentales que se iban produciendo, se vio completada con el *principio de exclusión*, de W. Pauli, que afirma que no pueden darse electrones con un mismo valor cuántico dentro de un mismo átomo; y con las teorías matemáticas de Paul Dirac, que sirvieron para predecir la existencia de electrones positivos antes de ser observados y registrados, en este caso, también mediante fotografías.

La aceptación de la mecánica cuántica produjo una gran convulsión en el seno de la ciencia por afectar de pleno a sus fundamentos epistemológicos. Ya no existía un modelo interpretativo único de la naturaleza, tal como había sucedido hasta entonces con el modelo clásico, instaurado por Galileo y Newton. Como defendió Bohr, era preciso recurrir a algún tipo de *complementariedad*, en donde los distintos modelos interpretativos pudieran convivir, a pesar de contar con elementos contradictorios entre sí. Los fenómenos no podían ser explicados bajo la perspectiva de una sola imagen física, sino bajo la combinación de varias. En contra de estos planteamientos, se levantaron posiciones más cautas que defendieron la provisionalidad de la situación, como hizo el propio Einstein o los defensores de la mecánica ondulatoria, que prefirieron continuar con los esquemas más tradicionales de hacer ciencia, exponiendo a un mismo tiempo claras dudas sobre las cuestiones de índole metafísica que venían acumulándose en la literatura científica. El gato de Schrödinger fue una llamada al orden llena de humor, ante tanta algarabía y desconcierto<sup>72</sup>. La situación llegó a su extremo con la enunciación en 1927 de las *relaciones de indeterminación* por Werner Heisenberg. Nuevamente, la observación, como elemento fundamental del método científico, y la fotografía, en este caso la perteneciente a los trazos de partículas recogidos por la cámara de niebla, fueron hechos de especial relevancia.

*Puede que fuera esa misma noche hacia las doce cuando recordé de pronto mi conversación con Einstein. Me vinieron a la mente sus palabras: "Solo la teoría decide qué es lo que uno puede observar". Inmediatamente lo tuve claro: aquí había que buscar la llave de esa puerta que había estado tanto tiempo cerrada. Me fui a pasear por la noche por el parque de Fälld para reflexionar sobre las consecuencias de las palabras de Einstein. Siempre habíamos dicho a la ligera que se puede observar la trayectoria del átomo en la cámara de niebla. Pero quizás era menos lo que se observaba realmente. Tal vez lo que se veía era sólo una sucesión discreta de puntos del electrón imprecisamente determinados.*<sup>73</sup>

Sorprende cómo tantos siglos de historia de la ciencia, caracterizados por la edificación de un sentimiento de seguridad y confianza plenas en la infalibilidad y rigurosidad de las conquistas científicas, pudieron acabar en una sensación generalizada de desazón, traídas por dos palabras hasta entonces muy alejadas del ámbito científico: incertidumbre y relatividad. La fotografía experimentó también cierta frustración al serle denegada aquella seguridad otorgada por el positivismo y el materialismo durante tantos años. Sus productos se relativizaron, y quedaron marcados por la contingencia. Las cámaras, como cualquier otro instrumento de



observación, pasaron a ser parte del fenómeno observado. La suma de las mediciones era el único camino que nos podría dar una visión de conjunto del fenómeno estudiado, siempre bajo una perspectiva estadística. Los principios de la teoría cuántica, una vez aplicados al mundo de lo diminuto y microscópico, llevaban consigo su propia limitación.

*Es el desarrollo de la teoría de los quanta el que nos ha llevado a esta sorprendente conclusión: las incertezas de Heisenberg se oponen, en efecto, a que podamos atribuirle constantemente una posición y una velocidad bien determinadas en el espacio. No debemos asombrarnos mucho de ello. ¿Qué son, en efecto, el espacio y el tiempo? Son marcos que nos son sugeridos por la interpretación de nuestras percepciones usuales, es decir, marcos en los que pueden alojarse los fenómenos esencialmente estadísticos y macroscópicos que nuestras percepciones nos revelan. ¿Por qué, entonces, sorprenderse al ver que el grano, realidad discontinua, esencialmente elemental y microscópica, rehúsa insertarse exactamente en este grosero marco, adecuado solamente para representar los términos medios?<sup>74</sup>*

Nuevamente, las consideraciones metafísicas saltaban a relucir entre lo científicos. Y nuevamente, las argumentaciones de carácter epistemológico volvían a producirse en torno a las viejas escuelas del materialismo y del idealismo. Como hemos podido comprobar, la imagen tecnológica, y más concretamente, la fotográfica, tuvieron mucho que ver con esta apasionante historia.



## Notas del capítulo 3

- 1 Langevin, Paul. *Introducción a la relatividad*. 1947. Siglo XX. Bueno Aires. La Physique depuis vingt ans. p 8.
- 2 Ibid. p 9
- 3 Pierce, John R, y Noll, A Michael. *Señales. La ciencia de las telecomunicaciones*. Ed. Reverté, 1995. p 42. Título original: Signals. The Science of Telecommunications. Scientific American Library.
- 4 Crowther, J. G. J, Prescot Joule, William Thomson, J. Clerk Maxwell. *Hombres de ciencia británicos del siglo XIX*. Austral 1945. p 15.
- 5 Ibid. p 28.
- 6 Ibid. p 33.
- 7 Wiener. Norbert. *Cibernética, o el control y comunicación en animales y máquinas*. Metatemas 8, Tusquets Ed. 1998. p 64. Título original: Cybernetics or Control and Communication in the animal and the Machine. MIT, 1948 y 1961.
- 8 Andrade, E. N. da C. *A century of Physics. Physics from 1850 to 1900*. Nature, 13 de octubre de 1951. p 622. (Traducción propia)
- 9 Langevin, Paul. *El espíritu de la enseñanza científica*. En *Introducción a la relatividad*. 1947. Siglo XX. Bueno Aires. La Physique depuis vingt ans. p 145-47.
- 10 Op. cit. Andrade. p 624.
- 11 Planck, Max. *Termodinámica*. Del prólogo a la segunda edición, 1905. Calpe 1947. p 7.
- 12 En este contexto, Maxwell defendió la idea de un ser controlador de este proceso, que pasó a denominarse con el tiempo *demonio de Maxwell*; es éste un concepto que nos recuerda fehacientemente la caída libre de los átomos de Epicuro, autor, por lo demás, admirado por el físico escocés.
- 13 Op. cit. Broglie, Continuidad y... p 90- 91.
- 14 Ibid. p 90- 91.
- 15 Broglie, Louis. *Por los senderos de la ciencia*. Espasa Calpe, 1963. p 161 y ss. Título original: Sur les sentiers de la Science. Editions Albin Michel, 1960.
- 16 Hauser, Arnold. *The Social History of Art*. Vol. 4. Cap. 2. p 60 y ss. Vintage Books Ed 1985.
- 17 Op. cit. Madey.
- 18 Shiers, George. *Ferdinand Braun and the Cathode Ray Tube*. Scientific American, p 92.
- 19 Santini E- N. Mendel CH. Ed . *La Photographie a travers des corps opaques*. París, 1896.
- 20 Op. cit. Shiers. p 93.
- 21 Op. cit. Shiers. p 93.
- 22 En estos trabajos se encuentra el origen de lo que se conocerá posteriormente en física como plasma, palabra acuñada en 1928 por I. Langmuir.
- 23 Para una exposición más en detalle de estos descubrimientos, de sus primeras aplicaciones y repercusiones, ver Op. cit. Cuevas. p 177 y ss.
- 24 Op. cit. Shiers, p 100.
- 25 Op. cit. Weinberg. p 29 y 59.

- 26 Op. cit. Weinberg. p 29 y 59.
- 27 Johnstone Stoney concluyó en 1874 que la electricidad es de naturaleza atómica, a partir de una serie de experimentos con electrolisis. En 1891 propuso el nombre de electrón para la unidad eléctrica.
- 28 Fragmento de *Electricity and Matter*, de J. J. Thomson, citado por Sánchez Ron, José M, en Marie Curie y su tiempo. ABC, 2000. p 49.
- 29 Un electrón voltio, eV, se define como la energía, ganada o perdida, por un electrón, o cualquier otro tipo de partícula de igual carga, que se mueve a través de una diferencia de potencial de un voltio.
- 30 Op. cit. Weinberg. p 58.
- 31 Rutherford, Ernest. *Science in Development*. Nature, 21 de noviembre de 1936. p 865.
- 32 *Photography as an aid to Scientific Work*. An Ilford Textbook. Ilford, 1950. p 33-4.
- 33 Op. cit. Burke, p 278-9.
- 34 Para una exposición más en detalle de este descubrimiento y de la participación de la fotografía en el mismo, ver Op. cit. Cuevas. p 188.
- 35 Op. cit. Eder. History of... p 147-8. 339 y 767.
- 36 Op. cit. Sánchez Ron. p 56-7.
- 37 Ibid. p 126.
- 38 Op. cit. Sánchez Ron, p 75.
- 39 También Marie Curie, ampliaba las sombras de las hojas de oro de su electroscopio sobre una pantalla con la ayuda de un proyector, tal como señala Reid, Robert, en su biografía. *Marie Curie*. Salvat Editores, 1985. ["Marie Curie", Camair Press] p 244.
- 40 Rutherford, Ernest. *Radioactive Transformations*. Oxford Univ. Press, 1911. p 224,228 y 232..
- 41 Op. cit. Galison. p 75.
- 42 Comentarios de Charles Millard, recogidos por Galison . Op. Cit. Galison. p 84-5.. "Mientras que los fotógrafos americanos eran por lo general científicos o aventureros y los franceses tendían a provenir del ámbito de los pintores, los aficionados victorianos se situaban entre estos dos extremos... consiguiendo mezclar con éxito una evocación emocional con la afirmación objetiva de un hecho físico consumado.
- 43 Op. cit. Rutherford. *Science in Development*. p 866.
- 44 Op. cit. Rutherford. *Science in Development*. p 866.
- 45 Ibid. p 866.
- 46 Op. cit. Galison. p 119.
- 47 Op. cit. Galison, p 121. *Atlas of Typical Cloud Chamber Pictures*, de 1940.
- 48 Mayores detalles al respecto, pueden ser consultados en Cloud Chamber and Associated Techniques. Nature, 14 de mayo de 1955. p 832-3; y en Gabor, D. y Hampton, B. A Wilson *Chamber with Time- Marking of Particle Tracks*. Nature, 12 de octubre de 1957. p 746 y ss.
- 49 Op. cit. Eder. History of... p 128.
- 50 Cf. Tutton, A. E. H. *Great advance in Crystallography*. Nature, July 17, 1913. p 518.
- 51 Tutton, A. E. H. *The Crystal Space-lattice revealed by Röntgen Rays*. Nature, November 14, 1912. p 308. (Traducción propia)



- 52 Op. cit. *Great advanced...* p 521. (Traducción propia)
- 53 Cano, F. H. y Martínez Ripoll. *Cristalografía: transgrediendo los límites*. Anales de la Real Sociedad Española de Química. Segunda época. Abril - Junio 2003. p 131.
- 54 Perutz, M. F. *Sir Lawrence Bragg. Obituary*. Nature. 3 de septiembre de 1971, Vol. 233, p 74.
- 55 Op. cit, Cano. p 136.
- 56 Pickworth Glusker, J, y Trueblood, K. N. *Crystal Structure Analysis, A Primer*. Oxford Univ. Press. 1985. p 5.
- 57 Millikan, R. A, y Cameron, G. H. *New Results on Cosmic Rays*. Nature, 7 de enero de 1928. p 19.
- 58 Millikan, Roberto Andrés. *Electrones (+ y -), protones, fotones, neutrones y rayos cósmicos*. Espasa Calpe Argentina 1944. University of Chicago Scientific Series. pp275 y ss.
- 59 Ibid. p 280.
- 60 Ibid. p 290.
- 61 Op. cit. Weinberg. p 76.
- 62 Ibid, p 80.
- 63 Un amplio recuento del desarrollo de la espectrografía hasta 1927, se encuentra en Op. cit. Cuevas. Cap. La fotografía de los espectros. p 132 y ss.
- 64 Ingram, D. J. E. *From Radar to Spectroscopy: New regions of the Spectrum*. Nature, 16 de septiembre de 1961. p 1146.
- 65 Ibid. p 1146.
- 66 Op. cit. Weinberg, S. p 62.
- 67 En Diciembre de 1897, apareció un artículo firmado por Thomas Preston, titulado *The Zeeman Effect Photographed*; en el que se afirmaba haber conseguido lo deseado por la editorial de esta revista de fotografiar el espectro modificado por la acción de un campo magnético: "Tras la cantidad de dificultades y errores preliminares de costumbre, por fin he podido fotografiar todas las figuras descritas por el profesor Zeeman; por lo que adjunto tres negativos que muestran el carácter general del fenómeno, y que verifican las observaciones de Zeeman". p 17. (Traducción propia)
- 68 Op. cit. Weinberg, p 62.
- 69 En 1908, el astrónomo G. E. Hale escribió una carta a Zeeman, en la que confirmaba su intuición sobre la existencia de campos magnéticos muy intensos en la superficie del sol, a resultas de sus estudios sobre la alteración de las líneas espectrales de otros cuerpos celestes. (ver Pieter Zeeman. Biography, en Nobel Prizes. <http://nobelprize.org>.)
- 70 Bohr, Niels. *Conferencia en memoria de Rutherford*. 1958. Versión de 1961 de la conferencia impartida en la Physical Society de Londres. Op. cit. Nuevos ensayos... p 47.
- 71 Op. cit. Broglie. *Materia y Luz*. p 95 y 96.
- 72 Schrödinger planteó este callejón sin salida con su bien ilustrativa *paradoja del gato*. En una caja herméticamente cerrada en la que no podemos ver su interior hay encerrado un gato al que apunta un fusil, que, caso de ser disparado, no erraría el tiro. El arma de hecho sólo podría ser disparada por la acción de un fotón que incidiera sobre un mecanismo electrónico que hemos preparado en el

interior de la caja. Este montaje experimental quedaría completado por un pequeño orificio por el que hacemos pasar el fotón, y por un espejo semitransparente. Cabría entonces la posibilidad de que el fotón entre en la caja y al llegar al espejo bien sea rebotado, con lo que no pasaría nada, o que siguiera recto y activara el dispositivo haciendo disparar el fusil. Lo lógico sería pensar que una vez enviado el fotón, y sin necesidad de abrir la caja, o de lo que es lo mismo de observar, sabríamos que una de las dos posibilidades habría ocurrido: el gato estaría vivo o muerto. Por el contrario, la otra visión del asunto sería que el fotón ha sido bien *potencialmente* absorbido o *potencialmente* reflejado por el espejo, con lo que el gato estaría a su vez muerto o vivo en potencia, siendo el observador, el que abriendo la caja, sería el responsable de la muerte del pobre animal.

73 Heisenberg, Werner. *Marchando hacia un nuevo mundo*. (1926- 27) Artículo recogido en *La parte y el todo. Conversando en torno a la física atómica*. Ellago ediciones, 2004. Título original: Der teil und ganze. p 106.

74 Op. cit. Broglie, *Continuidad...*, p 9.







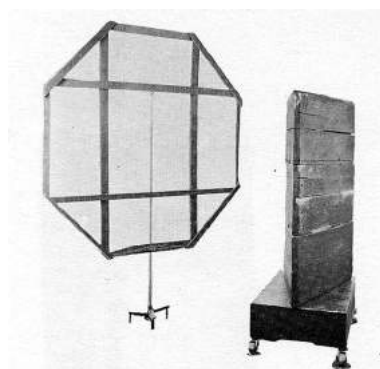
## Capítulo 4. La fotografía en la creación de la imagen electrónica. 1900- 1960.

### 4.1. Electrones a distancia. El nacimiento de la tecnología radio

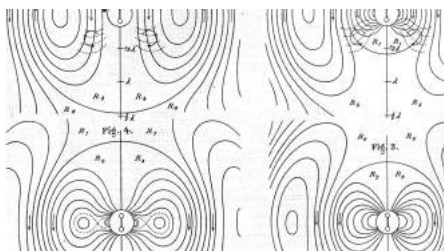
La tecnología radio, o tecnología dedicada a los procesos de transmisión y recepción de señales electromagnéticas que se comportan en forma de ondas propagadas a través del espacio libre, queda dividida en dos campos de aplicación bien diferenciadas. Uno es el de las telecomunicaciones, que afecta principalmente a la televisión y la radio como instrumentos de comunicación de masas, y a los distintos sistemas de telecomunicación que desde la aparición del telégrafo se han ido sucediendo (teléfono, fax, videoteléfono, internet, telefonía móvil, etc.), caracterizados por la doble direccionalidad en el establecimiento de las comunicaciones. El otro ámbito de aplicación de la tecnología radio es eminentemente científico, aquí la amplia diversidad de técnicas de medición y de observación a distancia, es utilizada para indagar en la naturaleza de los fenómenos, normalmente de aquellos que no quedan cubiertos convenientemente por los medios ópticos.

En el contexto histórico, ambas aplicaciones tienen orígenes y desarrollos comunes que se sitúan de pleno en el proceso de estructuración del electromagnetismo como ciencia en la segunda mitad del siglo XIX. Los trabajos de Joseph Henry, Berend W. Feddersen y David E. Hughes son precursores en este sentido, siendo integrados de forma magistral por las obras de Maxwell, ampliamente comentadas en estas páginas<sup>1</sup>. A su vez, el trabajo experimental de Hertz, desarrollado entre los años 1886 a 1888, sirvió para verificar estas tesis y para asentar las bases del desarrollo de la futura radiocomunicación. Con una instrumentación un tanto precaria, a base de bobinas de inducción y detectores en forma de anillos, contruidos con piezas de metal muy rudimentarias, Hertz comprobó cómo las radiaciones electromagnéticas producidas por las descargas eléctricas, presentan los mismos rasgos observados en la luz; esto es, pueden reflejarse, refractarse, polarizarse, o interferirse. Los diagramas dibujados por este científico, o los prismas embadurnados de betún, utilizados para comprobar la refracción de las ondas, - hecho que lo acerca curiosamente al procedimiento fotográfico original de Niépce - dan la medida exacta de hasta qué punto se ansiaba la visualización de unos fenómenos que se mantenían ocultos a los ojos de los investigadores (Figuras 4.1., 4.2., 4.3., y 4.4.). Los trabajos experimentales en esta dirección fueron continuados por numerosos científicos, entre los que cabe destacar a Augusto Righi y Oliver Lodge.

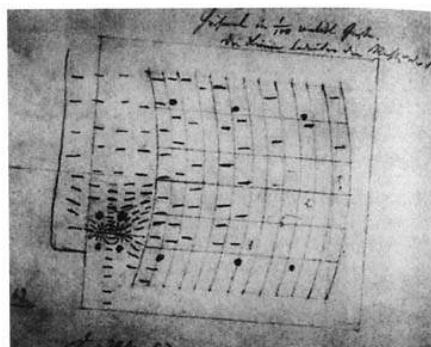
A partir de los resultados obtenidos por Hertz, numerosos investigadores comenzaron a buscar aplicaciones más prácticas a estas conquistas, siendo el campo de las telecomunicaciones el que más destacó en un primer momento a través de las figuras de Alexander S. Popoff, Edouard Branly, Reginald Fessenden y Guillermo Marconi<sup>2</sup>. Ya vimos en capítulos anteriores, cómo en estos mismos años,



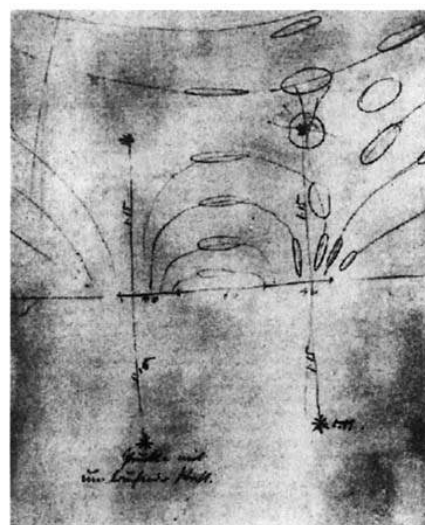
*Fig.4.1. Equipo original de Hertz, construido entre 1886 y 1888; con rejilla polarizada para las ondas y prisma de materia bituminosa para probar la refracción de las ondas.*



**Fig. 4.2. Dibujo de Hertz en el que se muestran las líneas de flujo alrededor de un dipolo oscilante.**



**Fig. 4.3. Notas de laboratorio, y simulacro de ondas electromagnéticas. H. Hertz, Dic. 1887.**



**Fig. 4.4. Notas de laboratorio de Hertz, y dibujo sobre la propagación de ondas. 1887.**

se consiguió efectuar las primeras transmisiones de imágenes a distancia a nivel comercial y mediante la tecnología de Korn, concretamente con los primeros envíos de fotografías entre diferentes periódicos europeos de Berlín, París y Londres. La radiocomunicación se perfeccionó tecnológicamente tan pronto como las primeras transmisiones de radio comercial se llevaron a cabo a partir de 1922 en diversas capitales europeas; y una vez que la tecnología de la televisión comenzó sus primeras transmisiones en Alemania e Inglaterra, en los años 1935 y 1936, respectivamente. Sin embargo, para que dichos avances pudieran materializarse, fue necesario el desarrollo previo de la válvula termoiónica, pieza fundamental del desarrollo de la ciencia electrónica, a cargo de figuras como Valdwemar Poulsen, Ernst F. W. Alexanderson, John Ambrose Fleming y Lee de Forest.

La válvula tiene sus antecedentes más directos en tecnologías que han sido tratadas ampliamente en estas páginas, como la de producción de vacío, las lámparas incandescentes, los tubos de vacío, y el recién mencionado cohesor de Branly. Este último fue rápidamente sustituido por el *detector de cristal*, que es a su vez un antecedente directo de lo que serían en el futuro los primeros dispositivos semiconductores de estado sólido. Este tipo de detector funcionaba a modo de rectificador, permitiendo el paso de la corriente en un sólo sentido y transformando las radiofrecuencias de los transmisores de chispa en una corriente de ruido que podía ser detectada con unos auriculares. El paso siguiente fue llevar a la práctica las lecciones sobre resonancia y sintonización de frecuencias dadas por Lodge, que fue responsabilidad de Marconi. De cualquier forma, los transmisores de chispas producían señales muy incoherentes que resultaban ineficaces para un uso telefónico. En 1903, Valdwemar Poulsen propuso la utilización de un arco oscilante para lograr señales de radio de ondas sinusoidales, estables y coherentes, lo que posibilitó unas comunicaciones de radiotelegrafía más efectivas y las primeras experiencias de transmisión de voz. En 1906,

Ernst F. W. Alexanderson construyó un alternador, o generador rotativo de corriente alterna, que supuso un gran avance para las comunicaciones sin cable. Las primeras experiencias de transmisión de voz por radio de Fessenden, ya comentadas, fueron posibles gracias a esta nueva fuente de generación de ondas<sup>3</sup>. Es este el contexto en el que apareció la válvula electrónica, como dispositivo capaz de producir, detectar, amplificar y procesar todo tipo de señales electromagnéticas. Su idea original se debe a un ingeniero contratado por Marconi, John Ambrose Fleming (1849- 1945), quien construyó un primer prototipo de válvula, llamada diodo, basándose en los estudios que él mismo realizó unos años

antes sobre el *efecto Edison*. Este es un fenómeno propio de las lámparas incandescentes, que consiste en la aparición de una línea blanca sobre la superficie interna y quemada del cristal de las bombillas, y que se forma a modo de huella una vez que el filamento queda proyectado como una sombra sobre el cristal. Fleming, para evitar este fenómeno, recubrió la patilla negativa del filamento con una placa de metal, comprobando, para su sorpresa, que la corriente aumentaba en la placa a medida que llegaban las ondas electromagnéticas, tal como quedó recogido en un galvanómetro. El artilugio amplificador fue bautizado en 1904 con el nombre de *válvula termoiónica*<sup>4</sup>. (Figura 4.5.). Dos años después, este primer prototipo de válvula sufrió una modificación esencial a manos de Lee de Forest, que permitió la amplificación de las señales débiles a niveles extraordinarios, simplemente cambiando la placa de Fleming por una rejilla que servía de modulador de la fuente de electrones en su camino del cátodo al ánodo. Este modelo de válvula recibió el nombre de *audión* o *válvula triodo* ( la rejilla era el *tercer* elemento a tener en cuenta), convirtiéndose en una tecnología esencial en el desarrollo de la electrónica y de todas las tecnologías dependientes de ella, especialmente las telecomunicaciones (telefonía, telegrafía, radiodifusión, televisión, etc.), y la informática. La llegada del transistor a mitad de siglo, supuso el relevo paulatino de esta tecnología, y el inicio de una nueva era de la electrónica.

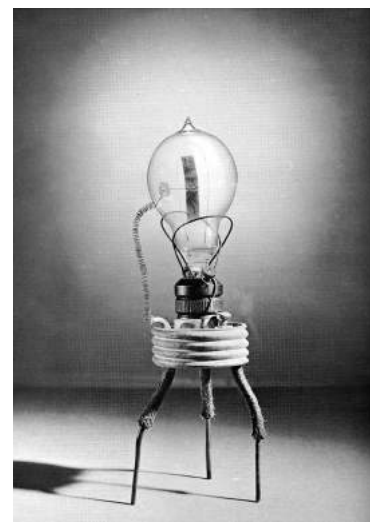


Fig. 4.5. Válvula termoiónica de Ambrose Fleming, de 1904.

En el ámbito científico, no tardaron en encontrarse aplicaciones muy fructíferas a toda esta tecnología, especialmente para la detección de señales no necesariamente ligadas a las telecomunicaciones; aun cuando fue la industria ligada a este sector la que potenció la investigación en este sentido. En 1933, Karl Guthe Jansky, de los laboratorios Bell, descubrió la primera fuente de ondas de radio procedente de un lugar fuera de nuestro planeta, cuando estudiaba una serie de interferencias que afectaba a las radiocomunicaciones producidas por las cargas electrostáticas presentes en la atmósfera. La visualización de estas señales se llevó a cabo con un osciloscopio asociado a una antena, que operaba en una longitud de onda de 15 metros (Figura 4.6). Este hallazgo le llevó a defender que la procedencia de estas señales iba más allá de las interferencias habituales, producidas por las tormentas o los fenómenos atmosféricos, sugiriendo que estaban originadas en alguna zona cercana al centro de nuestra galaxia<sup>5</sup>. En 1937, Grote Reber, siguiendo las experiencias de Jansky, construyó el primer radiotelescopio de la historia en el jardín de su casa, con una antena parabólica de nueve metros y medio con la que obtuvo el primer radiomapa de la Vía Láctea. La era de la radioastronomía quedó abierta con estas dos importantes experiencias.

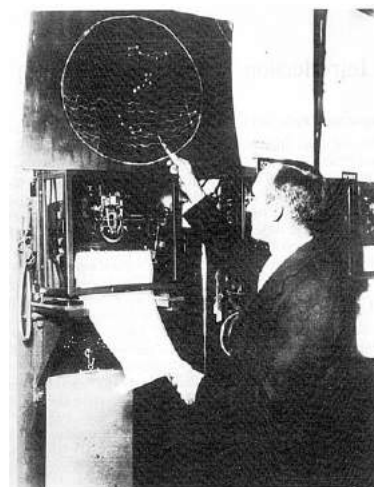


Fig. 4.6. Jansky mostrando las señales de radio relativas a una fuente de radiación situada en el centro de la galaxia. 1933.

La irrupción de la segunda guerra mundial fue un gran revulsivo para las investigaciones en radiotecnología. Dentro del grupo de investigadores e ingenieros que trabajaron en la puesta en práctica de la tecnología radar para la



defensa antiaérea británica, destacó J. S. Hey. Este científico pudo detectar en 1942 las primeras radioemisiones procedentes del sol, hecho que se relacionó con una gran mancha aparecida en ese momento en el disco solar. Ese mismo año, se detectaron nuevamente en los laboratorios Bell señales de radio procedentes de este astro. La defensa antiaérea en Inglaterra contra las bombas teledirigidas V2 del ejército alemán, potenció el desarrollo de sistemas de detección por radiofrecuencias, especialmente del radar, técnica que se convirtió con el tiempo en una herramienta científica muy poderosa. Las continuas interferencias detectadas en estas operaciones militares fueron atribuidas por los científicos destinados provisionalmente a estas labores a la misma emisión cósmica revelada por Jansky. En estas fechas, fue comprobándose asimismo el origen de otros tipos de interferencias muy comunes en estas operaciones, encontrándose sus causas en el paso de meteoros, o en las manchas y fulguraciones solares. Cabe destacar en este contexto, el registro fotográfico de meteoros, llevado a cabo entre 1938- 40 por F. L. Whipple, determinante para poder asociar este tipo de fenómeno al paso previo de cometas unos días antes, un dato que sería fundamental en el futuro para la predicción de las lluvias de meteoros <sup>6</sup>. Estos estudios coincidieron en el tiempo con los llevados a cabo por Blackett y Lovell sobre los rayos cósmicos, en los que los procedimientos fotográficos desempeñaron un papel determinante. En 1946, fueron detectadas emisiones térmicas de radio y ecos de radar procedentes de la luna. Las predicciones acerca de la existencia de una línea asociada a la longitud de onda de 21 cm, propia del átomo neutro de hidrógeno en el espacio intergaláctico, fue verificada en 1951, siendo un descubrimiento de suma importancia en astronomía, dada la fuerte presencia de este elemento en la materia interestelar. El desarrollo de las técnicas asociadas a la radio emisión y recepción de señales no ha cesado desde estas primeras fechas, dando lugar a hallazgos fundamentales para la ciencia, especialmente para la astronomía, que ha visto coronados estos hechos con la detección e identificación de múltiples estrellas, nebulosas, y cuerpos como púlsares y quasares.

La tecnología radio afecta al universo de la imagen tecnológica profundamente; por un lado, por constituir un vehículo imprescindible para la transmisión a distancia de las imágenes, tal como comprobamos cada día en la televisión, o en el envío de imágenes científicas provenientes de las naves y sondas desplazadas al espacio sideral; y por otro, porque esta franja tan variada y extensa del espectro electromagnético ha necesitado desde sus orígenes de la utilización de diferentes formas de representación y de visualización de sus fenómenos, siendo éste un hecho que ha afectado directamente al universo de la producción de imágenes. Existe una tercera área de aplicación de las técnicas de radio, como es la telemetría, que ha dado origen a una de las instrumentaciones más potentes que existen en la actualidad para el conocimiento de los espacios inaccesibles a la visión humana, tales como los fondos marinos o los espacios intergalácticos. Tanto las técnicas de visualización asociadas a la radio, como las de telemetría constituyen una fuente de información imprescindible para los científicos dedicados a la radioastronomía, la meteorología, la oceanografía, o la geofísica.

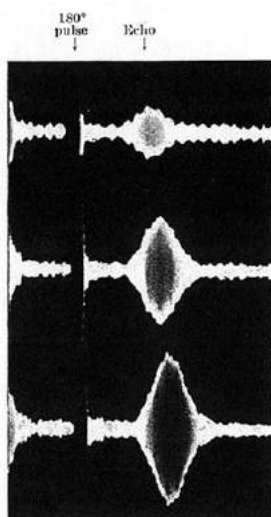
Es importante resaltar, que la incorporación de la franja radio del espectro a la producción de imágenes ha supuesto un avance sin precedentes en la historia de la ciencia del siglo XX. Multitud de fenómenos, tanto del universo celular como de los espacios astronómicos, se han hecho visibles de esta forma. Las técnicas de observación basadas en la traducción de las señales de radio a señales visibles, se han extendido a prácticamente la totalidad de las ramas científico- técnicas, desde la resonancia magnética, al ultrasonido, al radar, o al sónar. En este sentido, la franja espectral de las microondas, situada entre el infrarrojo y las ondas de radio propiamente dichas, ha contribuido a edificar una de las tecnologías con mayor impacto en la ciencia edificada tras la segunda guerra mundial. Bleany y Good <sup>7</sup> fueron los primeros en aplicar la tecnología radar y de las microondas al estudio de



las moléculas. La alianza de espectroscopía y microondas ha dado origen a tecnologías tan importantes como la resonancia electrónica, con múltiples ramificaciones, que serán contempladas en capítulos posteriores.

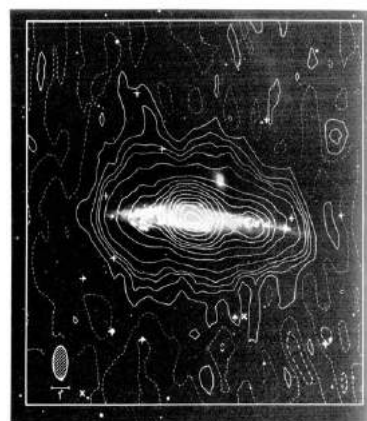
El desarrollo vertiginoso que ha experimentado la tecnología radio desde su nacimiento ha sido posible gracias a un cuerpo teórico que ha ido madurando a lo largo de los años, apoyado en la experiencia de multitud de nuevas observaciones y en el grado de especialización al que ha llegado la ciencia del electromagnetismo en estas cuestiones. El estudio del comportamiento de las ondas ha sido crucial, llegándose a un conocimiento muy profundo de su naturaleza electrónica. Si en el agua, las ondas se deben a la relación que se establece entre las energías relativas a la altura de las olas y a la fuerza gravitacional; en la propagación de ondas electromagnéticas, lo determinante es el intercambio que se produce entre la energía eléctrica y la magnética. Las ondas de radio se deben al movimiento de los electrones, particularmente alrededor del átomo. Cada vez que se altera el movimiento de un electrón, éste produce una onda electromagnética. Las variaciones en la velocidad de un electrón en un circuito eléctrico, propio de un transmisor al que se le aplica un voltaje oscilante, se traducen en las correspondientes emisiones de ondas, propagadas por el transmisor, y que en este caso pueden ser de radio. La detección de ondas de radio puede darse en base a sólidos, pues todo cuerpo irradia en mayor o menor proporción cierta cantidad de radiación térmica; o en gases, que irradian en consonancia con la temperatura a la que están sujetos, hecho que es, a su vez, un índice del movimiento de sus partículas. La repulsión de los iones en un gas, o de los átomos cargados positivamente, estado denominado *plasma*, sobre los electrones libres genera un cambio de movimiento en estos que son el origen de las ondas de radio. Este tipo de producción de ondas, presente en sólidos y gases, es térmica, mientras que la que se produce por un transmisor de radio o de televisión es no- térmica. Las más comunes, entre las primeras, son las que emiten las capas de hidrógeno ionizado alrededor del sol u otras estrellas calientes; las no- térmicas se presencian en determinadas fuentes astronómicas y en los transmisores artificiales, y son fácilmente identificadas por el tipo de espectro producido y por la intensidad creciente que manifiestan de acuerdo a su voltaje. Una de las diferencias más sobresalientes entre estas dos formas de radiaciones es la polarización de las ondas, mientras que en los primeros las ondas están polarizadas al azar, en los segundos están linealmente polarizadas, se propagan paralelamente a la longitud del dipolo. El estudio de la polarización de las ondas proporciona información muy fecunda, relativa a los campos magnéticos presentes tanto en el lugar de origen de la radiación, como a lo largo del recorrido de su propagación. Las experiencias originales de Faraday, al proyectar un haz de luz a través de un cristal al que sometió a un campo eléctrico, marcaron el inicio de estas experiencias.

Las señales de radio son muy débiles si las comparamos con las del resto del espectro electromagnético, incluido el visible; se necesitan medios electrónicos capaces de amplificar esas señales para poder ser oídas, o para hacerlas visibles por medio de la representación en un gráfico. Por otro lado, las ondas de radio presentan unas longitudes enormes, si las comparamos con las longitudes de onda que son utilizadas por los instrumentos de observación o por los propios ojos, lo que significa que su poder de resolución es muy bajo. Para hacernos una idea al respecto, basta pensar que para obtener una resolución de un metro de longitud de onda, es preciso construir un radiotelescopio de tres kilómetros de diámetro<sup>8</sup>. Sin embargo, existen una serie de puntos comunes, por ejemplo, las ondas de radio viajan aproximadamente a la velocidad de la luz. Y existen una serie de fenómenos que son resultado de la relación estrecha que se produce entre los fotones y los electrones partícipes en este tipo de radiaciones, como son el *efecto Compton*, que hemos estudiado en capítulos anteriores, la *radiación sincrotrón*, que es entendida como un efecto anti- Compton, y consiste en radiaciones de alta



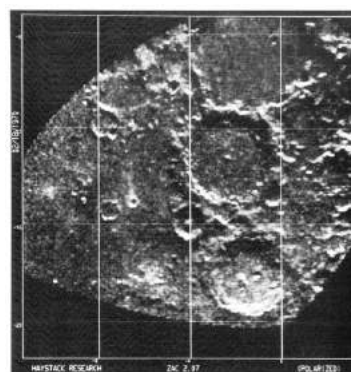
**Fig. 4.7. Resonancia magnética nuclear, llevada a cabo en agua y utilizando el campo magnético terrestre. 1957.**

energía que producen los electrones que se acercan a la velocidad de la luz, aportando a los fotones más energía; la *radiación de línea espectral* (Spectral Line Radiation), que hace mención a las emisiones radio concentradas en determinadas longitudes de onda, tal como ocurre con las radiaciones luminosas; los *electrones spin*, concepto relacionado con el tipo de giro sobre sí mismo que acompaña a los electrones alrededor de la órbita atómica; los *másers interestelares*, que presentan líneas espectrales finas e intensas; el *efecto Doppler*, etc. Todos estos fenómenos observados y estudiados en profundidad, gracias a las diversas tecnologías radio desarrolladas en los últimos cincuenta años, han sido decisivos en la comprensión del universo atómico, celular y astronómico.



**Fig. 4.8. Mapa de radio superpuesto a fotografía, que muestra de canto la galaxia NGC 4631. 1977.**

La diferencia entre los métodos de observación ópticos y los de radio y/o acústicos, es manifiesta. Mientras que los primeros producen una imagen que puede ser directamente observada o registrada por cualquier método, ya sea fotográfico o electromagnético; los segundos producen una serie de señales eléctricas que deben ser convenientemente amplificadas y diferenciadas para poder ser analizadas convenientemente. Este conjunto de señales invisibles suele ser representada gráficamente con la ayuda de osciloscopios, de sistemas de impresión gráfica convencionales, o traducidas a imágenes espectrográficas, relativas a la resonancia magnética nuclear (Figura 4.7), o a imágenes sintéticas que nos ayudan a ver el fenómeno en su conjunto y de una forma más directa, a mapas de densidad electrónica, radiomapas, radiofotografías, radioheliografías, mapas de radar, imágenes interferométricas de radar, mapas de polarización, etc. (Figuras 4.8. y 4.9.). Ejemplos de esto último, los encontraremos en el capítulo dedicado a la radioastronomía.



**Fig. 4.9. Imagen interferométrica de radar. Región de la luna perteneciente a los cráteres Alfonso, Ptolomeo y Arzaquel, y parte del Mar Nubium. 1972.**

## 4.2. La fotoelectricidad

Al igual que el desarrollo de la fotografía durante la mayor parte del siglo XIX se apoyó en todo el bagaje de experiencias adquiridas desde finales del siglo XVIII en torno a la fotoquímica, el desarrollo de la fotoelectricidad y de la imagen electrónica, cuya presencia se comenzó a sentir con fuerza a partir de las primeras décadas del siglo XX, con ramificaciones que llegan a nuestros días, se apoyó en un conjunto de fenómenos descubiertos y comprendidos en la segunda mitad del

siglo XIX. Los fenómenos fotovoltaicos, de fotoemisión y de fotoconducción, tal como vimos en capítulos anteriores, son descubrimientos decimonónicos que no logran una interpretación completa y exhaustiva hasta que Einstein, entre otros, consigue aplicar las nuevas tesis de la teoría cuántica al fenómeno fotoeléctrico. Se puede afirmar que la ciencia de la fotoelectricidad como tal, se constituye en torno a las tres primeras décadas de este mismo siglo, una vez que sus bases experimentales y teóricas se asientan sobre estos tres fenómenos, y una vez que comienzan a proliferar sus principales aplicaciones prácticas, materializadas en una serie de mecanismos de visualización, detección y medición de fenómenos.

*Concretamente, la ciencia de la fotoelectricidad estudia el efecto de la luz sobre los fenómenos eléctricos. Las tres manifestaciones más importantes de este efecto son (1) la generación de una fuerza electromotriz entre dos electrodos cuando uno de ellos, o el medio que interviene, es iluminado, (2) la reducción de la resistencia eléctrica de los materiales por medio de la luz, y (3) la emisión de partículas cargadas (electrones) por las superficies iluminadas. Estos fenómenos son comúnmente conocidos como los efectos fotovoltaico, de fotoconducción y de fotoemisión, respectivamente.<sup>9</sup>*

Recordemos que fue el efecto fotovoltaico el primero en ser descubierto, por E. Becquerel en 1839. El hallazgo se produjo al constatar una variación de voltaje en el galvanómetro, cada vez que era expuesto a la luz uno de los electrodos inmersos en un baño electrolítico. Por esta razón, este fenómeno es el único, entre los tres mencionados, capaz de producir una diferencia de potencial por sí solo. Sus aplicaciones más sobresalientes se han producido en los diferentes fotómetros de uso fotográfico y exposímetros, que hacen uso de las células fotovoltaicas de selenio y de silicio, desarrolladas a partir de la década de los treinta del siglo XX. Además, se encuentra su conocida aplicación en la producción de energía eléctrica mediante las células solares fotovoltaicas. Tras el hallazgo de Becquerel, Willoughby Smith detectó en 1873 el fenómeno de la fotoconducción, consistente en el cambio que se produce en los niveles de resistencia eléctrica de ciertos metales, fundamentalmente el selenio, ante la presencia de luz. Este es el motivo de que reciban a menudo el nombre de *fotorresistores*. La tecnología desarrollada a partir de este fenómeno tuvo que esperar hasta la década de los sesenta del siglo XX, para ser aplicada comercialmente en las fotocélulas de fotómetros y sensores, construidas por deposición química de materiales como el selenuro de cadmio o el sulfuro de cadmio en pequeñas películas policristalinas de materiales cerámicos. Por último, el efecto de fotoemisión, conocido mayormente como fenómeno fotoeléctrico, fue descubierto por H. Hertz en 1887, al comprobar la liberación de electrones producida en la superficie de distintos metales por la acción de la luz. En este fenómeno se encuentra el origen de la tecnología de los fototubos, tubos de imagen e intensificadores y convertidores de imagen.

El conocimiento exhaustivo de estos fenómenos ligados al electromagnetismo, acabó por afectar a gran número de disciplinas científicas, hasta el punto de que sus unidades básicas, el fotón y el electrón, comenzaron a estar presentes en las bases teóricas e interpretativas de muchos de los fenómenos a los que estas ciencias están dedicadas. Tal fue el caso de los mismos procesos fotográficos, que pronto comenzaron a ser interpretados desde la perspectiva que marcaron los nuevos principios nacidos de la fotoelectricidad y la electrónica.

*Los fotógrafos científicos tal vez se interesen por el intento de reducir la teoría física concerniente a la imagen latente de la placa fotográfica, a términos de la teoría electrónica.<sup>10</sup>*

A medida que avanzó el siglo XX, la fotoelectricidad fue consolidándose en base a una terminología y unos conceptos básicos, y tras emplazar el conjunto de sus conocimientos dentro de disciplinas científicas nuevas y más integradoras. Es el caso de la *física del estado sólido*, fruto del extraordinario avance científico-tecnológico que se produjo en torno al estudio y aplicaciones de los materiales semiconductores. La tecnología de la imagen y, más en particular, la instrumentación encargada de la captación y medida de radiaciones pertenecientes al amplio abanico electromagnético, terminó por encuadrarse dentro de este nuevo apartado de la física en el que confluyen los grandes avances de la electrónica, la informática y las telecomunicaciones. La comprensión del fenómeno fotoeléctrico dentro del marco de la física del estado sólido, marcó la pauta de construcción de los diferentes dispositivos de captación de imágenes que fueron apareciendo a lo largo del siglo, desde los tubos de imagen (iconoscopio, órthicon, vidicom), las diferentes células fotoeléctricas, faxes y escáneres, el kinescopio, hasta llegar a los actuales *sensores de estado sólido*.

El modelo interpretativo de la formación de imágenes, a partir de la creación de esta nueva instrumentación, está regulado por una terminología procedente de la electrónica de carácter analógico, desarrollada en la primera mitad del siglo, y por los principios y conceptos de la *teoría de la información*. La fotoelectricidad ha ido construyendo un lenguaje propio a lo largo de estos años, independiente del ya existente de la fotografía, en el que sobresalen términos como *sensor*, *rango dinámico*, *relación señal- ruido*, *corriente de oscuridad*, *ganancia*, *máquina- visión*, etc. Dentro de este contexto, tal vez sea el sensor de imagen el elemento central de este nuevo paradigma, en sustitución de la película fotográfica. Al mismo tiempo, la electrónica está imbuida de los conceptos y principios nacidos de la mecánica cuántica, donde llama la atención el hecho de que en el ámbito de la imagen electrónica, aparezca la cautela epistemológica suscitada por la formulación del *principio de indeterminación*.

*Para que un sensor produzca una señal válida, deber ser lo menos intrusivo posible en el sentido de que no debería cambiar lo que se supone que está midiendo. La presencia de un sensor alterará siempre, y hasta cierto punto, el campo de las variables físicas en el que está emplazado.*<sup>11</sup>

En el origen de este nuevo proceso de formación de imágenes se encuentra la luz, pero con la posibilidad de que este fenómeno se expanda hacia otros tipos de radiaciones o de energía. En el caso de la luz visible, el objeto o la escena que se quiere captar se hace presente por medio de los niveles de luminancia o brillo que irradian sus partes dispuestas tridimensionalmente. Este proceso de adquisición prosigue en un segundo nivel, relativo a la detección que el sensor lleva a cabo de la escena objetivo; aquí se produce una transformación de energías de acuerdo con el modelo interpretativo del efecto fotoeléctrico<sup>12</sup>. El proceso culmina con la fase de reproducción, en la que los objetos irradiantes quedan representados normalmente en un plano de dos dimensiones, y en soportes y superficies de distinta índole: desde un monitor de ordenador, un fax, un tejido, a un papel fotográfico. En el interior de este proceso asistimos, por tanto, a un doble acontecimiento: a la *transducción* de la energía fotónica en eléctrica, y a la transformación de esa energía resultante en *información*. La primera fase, eminentemente física, consiste en emplazar un conjunto de señales, que son fruto del efecto fotoeléctrico, en una secuencia temporal. La segunda fase, esencialmente informática, tiene como fin el manejo de un conjunto de señales, susceptibles de ser procesadas por un ordenador. El sensor responde a los estímulos luminosos, básicamente con cuatro funciones: sensibilidad, transporte,



almacenamiento y salida. Por tanto, actúa como un transformador de fuentes de energía, de lumínica a eléctrica, y como un acumulador de cargas, por lo que en realidad, a su capacidad transductora o reconvertidora de energía, se añade la de ser un condensador eléctrico; de ahí que reciba el nombre a veces de *fotocondensador* (Photocapacitor). Las variables físicas presentes en un sensor pueden ser vistas también desde el punto de vista de la ingeniería de sistemas; es decir, desde el punto de vista de variables de potencial, como son el voltaje, la presión, la temperatura o la velocidad; y de variables de flujo: corriente, masa fluida, flujo de calor y fuerza, cuyos productos quedan representados por la energía, y sus cocientes por la impedancia o la resistencia del sistema<sup>13</sup>. A su vez, el sensor puede ser de carácter pasivo o activo, dependiendo si su función es la detección sin más de un tipo de radiación incidente, con lo que precisaría de una fuente de energía para hacer visibles los fenómenos; o si el sistema del que es parte es capaz de emitir algún tipo de señal que haga posible la detección, como es el caso de las técnicas de ultrasonido, radar, detección y reconocimiento de imágenes.

Este modelo de funcionamiento de los sistemas electrónicos de producción de imágenes, se inició con la llegada de la tecnología de los transistores, una vez concluida la segunda guerra mundial, y se consolidó con el avance en los estudios de los materiales semiconductores. Tal fue el caso del fenómeno conocido como *Unión P-N* (P-N Junction), que dio lugar al desarrollo de un nuevo tipo de sensor, que se ha sumado a la lista de los existentes hasta entonces, y que son fruto de los tres fenómenos reseñados: de fotoemisión, fotoconducción y efecto fotovoltaico. Los sensores por *unión P-N* combinan en su funcionamiento el efecto de fotoemisión y el de fotoconducción, y se encuentran presentes en la mayoría de los sensores de estado sólido actuales, donde cabe destacar aquellos dedicados a la captación de imágenes. Las letras P y N hacen mención a dos tipos de materiales semiconductores que se utilizan en su fabricación. Tanto este tipo de sensores, que dan lugar a la tecnología CCD, como las cámaras de vídeo digital, conocidas en el universo electrónico como *cámaras del estado sólido* (Solid State Cameras), son consecuencia directa de la electrónica de carácter analógico, que se desarrolló en años anteriores, y que constituye el eje central de estas páginas. Es importante señalar que la tecnología de los *sensores de unión P-N*, junto con la tecnología CCD, marca un punto de inflexión en lo que a la producción de imagen tecnológica se refiere; y más en concreto, en el papel que la fotografía desempeña no sólo dentro de la ciencia, sino también en los ámbitos artísticos, documental y doméstico. Hasta la llegada de este tipo de tecnología, universalmente conocida como digital, la imagen electrónica de carácter analógico, estuvo ligada fundamentalmente a la captación y reproducción de imagen en movimiento; los fotogramas aislados, provenientes de sistemas de televisión o de vídeo, e imprescindibles para el estudio científico o para fines de almacenamiento o archivo, fueron impresos regularmente por medio de la fotografía convencional o por procedimientos electrofotográficos. La capacidad que tienen estos nuevos medios digitales para dedicarse por igual a la imagen fija como en movimiento, con niveles de resolución y sensibilidad muy por encima de su anterior hermana analógica, y equiparables a la fotografía convencional, es el factor que ha provocado esta verdadera eclosión en el panorama de la imagen tecnológica. Pero para producirse este desenlace, hizo falta construir primero la ciencia de la fotoelectricidad en torno a los dispositivos desarrollados principalmente con la tecnología de los tubos de vacío; de aquí, surgieron las diferentes fotocélulas o células fotoeléctricas, los tubos de imagen, que dieron lugar a su vez al osciloscopio y a los diferentes tubos utilizados por la televisión; y otros instrumentos de visualización tan importantes como el microscopio electrónico, que aparecieron con el desarrollo de la óptica electrónica.

### 4.3. Los fototubos y las células fotoeléctricas por emisión

Los primeros intentos de aplicación de dispositivos de captación lumínica de funcionamiento electrónico, en sustitución de los fotográficos convencionales, se llevaron a cabo en el campo de la astronomía a finales del XIX, concretamente en los estudios fotométricos, anteriormente reseñados, de la luna, y algunos planetas y estrellas cercanos, realizados en 1892 por Minchin, Monck, Dixon y Fidgeal (Ver capítulos 2.8.2. y 5.2.3). A su vez, estos ensayos tuvieron como antecedente los trabajos de E. Sabine, que descubrió en 1878 las propiedades fotométricas del selenio, al emplazar porciones de este metal en un electrodo de una célula fotovoltaica<sup>14</sup>. Sin embargo, no fue hasta la década de los treinta del siguiente siglo, que las células fotovoltaicas y los fototubos o sensores por fotoemisión, comenzaron a ser aplicados de forma masiva en los laboratorios, y a ser comercializados para su uso en la industria. La irrupción de la televisión electrónica, imponiéndose sobre el modelo electromecánico, dio un empuje decisivo a este tipo de tecnología.

Dentro de la tecnología de fototubos, fueron los dispositivos por fotoemisión los que dieron lugar a gran parte de la tecnología de la imagen imperante durante la mayor parte del siglo XX: la cámara de televisión, llamada en sus orígenes iconoscopio, los diferentes tubos de imagen derivados de ésta, tales como el orthicon o el vidicom; los aparatos receptores de televisión, en principio denominados kinescopios, y las diferentes células fotoeléctricas construidas con la diferentes tecnologías de fototubos disponibles: de vacío, de gas, y fototubos multiplicadores mayormente. El esquema de funcionamiento de este tipo de sensores obedece a un esquema simple: la llegada de luz o fotones a una superficie metálica, normalmente de un material alcalino, capaz de absorber esta energía y de liberar electrones, dándose la particularidad de que éstos no llegan a penetrar en la profundidad del metal sino que permanecen en las capas más superficiales del mismo. Por lo general, como el nivel de retención o la capacidad que tienen estos metales, normalmente sodio, potasio, o litio, de *aprisionar* o *retener* los electrones (work function) es muy baja, éstos quedan liberados fácilmente, produciendo el efecto de fotoemisión. Este efecto no tendría mayores repercusiones si se efectuara al aire libre y a temperatura ambiente, ya que la intensidad de los electrones es mínima, pero al ser emplazados en el cátodo de un tubo en el que se ha producido el vacío, o en el que hay presente un determinado gas, éstos se aceleran produciendo un voltaje que puede ser fácilmente detectado por un galvanómetro.

El primer fototubo de este tipo se suele atribuir a Elster y Geitel, y data de 1912. Estos autores, interesados por el efecto de la fotoelectricidad descubierto por Hertz, buscaron materiales que pudieran formar un primer prototipo de fotocélula o dispositivo capaz de medir la radiación lumínica. Comenzaron por probar con una serie de metales alcalinos, como el rubidio, cesio, potasio y sodio, emplazándolos en el cátodo de un tubo fabricado al vacío. Esto les permitió detectar la formación de pequeñas corrientes, utilizando incluso luz natural. Pero fueron los micrófonos utilizados en las telecomunicaciones de entonces, los que inspiraron una solución más conveniente, consistente en bañar con una capa de potasio el cátodo, construir el ánodo con un alambre en forma de bucle a fin de mejorar la captura de los electrones, e intercalando entre ambos una diferencia de tensión proporcionada por una batería. Con este modelo, un tanto rudimentario, consiguieron fabricar una fotocélula muy sensible a intensidades mínimas de luz, atrayendo pronto la atención de los científicos, en particular de los astrónomos, que lo pusieron pronto en práctica en telemetría de estrellas y en la detección de longitudes de onda más allá del infrarrojo. El fotómetro resultante de estas investigaciones tenía la apariencia de una pequeña arma de fuego, y fue utilizado, a modo de teodolito, en mediciones fotométricas del eclipse del 17 de abril de 1912<sup>15</sup>.

A partir de la segunda década del siglo pasado, la industria electrónica dedicada a la fabricación de válvulas termoiónicas, principalmente destinadas a las telecomunicaciones inalámbricas y a los aparatos domésticos de la recién estrenada radio, comenzó a fabricar fototubos y fotocélulas sensibles a la luz visible, natural y artificial. A partir de 1929, se consiguió que los fotocátodos de estos tubos expandieran su sensibilidad a la mayor parte del espectro electromagnético. Las primeras aplicaciones de los fototubos tuvieron lugar en el seno de los mismos laboratorios donde fueron desarrollados, concretamente para la detección y medición de pequeñas fotocorrientes, tal como hemos visto en astrometría y fotometría estelar (Figura 4.10.), o en espectrofotometría. Sin embargo, pronto comenzaron a ser utilizados en la captación y reproducción de sonido, abriendo las puertas a la época del cine sonoro, así como en la fabricación de cámaras y monitores de televisión, en los propios procesos de transmisión de imágenes, en técnicas de señalización luminosa por luz visible y de infrarrojos, o haciendo la función de relé en mecanismos de control, de detección de anomalías y de seguridad en procesos de fabricación industrial.

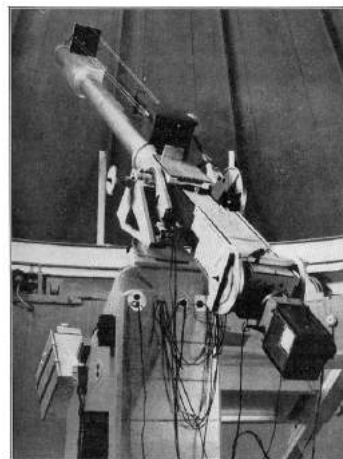


Fig. 4.10. Telescopio con célula fotoeléctrica. c.a. 1940.

#### 4.4. Fototubos de vacío, y de gas

Dentro de la tecnología de fototubos, encontramos fundamentalmente cuatro variedades en cuanto a su construcción y a sus aplicaciones: los de vacío, los de gas, los fotomultiplicadores y los tubos de imagen. Si en los primeros se produce el vacío como forma de acelerar los electrones emitidos bajo el efecto de un voltaje elevado y de signo positivo; en los segundos, se introduce un gas inerte para los mismos propósitos, siendo ambos de apariencia externa muy parecida (Figura 4.11). Los fototubos multiplicadores, por su parte, se deben al fenómeno de la *emisión secundaria de electrones* (Figura 4.12.). Este fenómeno consiste en que los mismos electrones acelerados activan a su vez otra superficie metálica que hace las veces de un nuevo electrodo, provocando un número mayor de electrones secundarios que son recogidos y medidos al final del proceso. Este fenómeno en cascada recibe el nombre de *ganancia*. En el caso de los tubos de imagen, en vez de contarse con una mera información sobre la cantidad de luz que ha sido recogida por el fototubo, como es el caso de los anteriores, se dispone de información relativa a la distribución espacial de la luz en el rayo incidente (Figura 4.13). Para que este nivel de desarrollo técnico se hiciera posible, fue necesario que se pusieran en práctica previamente las correspondientes técnicas de exploración de superficies, en especial de pantallas fluorescentes, y el conjunto de principios generados por la óptica electrónica. Para entonces, William Rowan Hamilton ya había señalado la posibilidad de agrupar o enfocar los electrones liberados desde los diferentes puntos del cátodo por métodos electromagnéticos, en la misma medida que un rayo de luz lo es por medios ópticos. En 1923, Vladimir

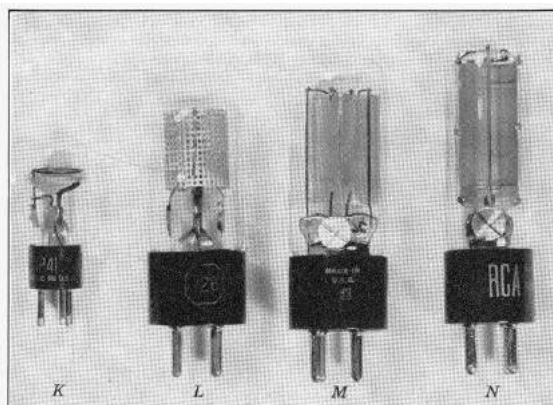


Fig. 4.11. Fototubos de gas. c.a.1940.





Fig. 4.12. Fototubo multiplicador.  
c.a.1940.

Zworykin construyó su primer *iconoscopio* basado en la tecnología de los fototubos de imagen (Figura 4.14.), y al poco tiempo desarrolló el *kinescopio* (Fig. 4.15.), denominaciones que se corresponden con lo que conocemos en la actualidad por cámara y receptor de televisión, respectivamente.

En el conjunto de las tecnologías fotoeléctricas, y en particular en la de los fototubos y células fotoeléctricas, salen a relucir los conceptos de *linealidad*, *rango dinámico*, *efectividad cuántica*, o *respuesta espectral*. La linealidad hace referencia a la directa proporcionalidad existente entre la incidencia de la luz y la emisión de electrones, que de forma ideal estos mecanismos manifiestan. Este es un concepto íntimamente relacionado con el de eficiencia cuántica, o relación que se produce entre los fotones incidentes en la superficie fotosensible y el número de electrones liberados. Esta capacidad queda normalmente menguada en los valores máximos por un componente de fatiga consustancial a todo

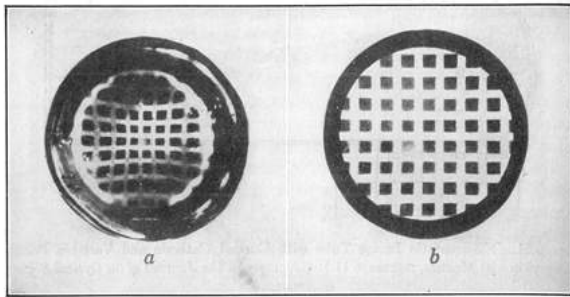


Fig. 4.13. Imagen de un fototubo, 1936.  
Corresponden a un cátodo plano y a uno curvo,  
respectivamente.

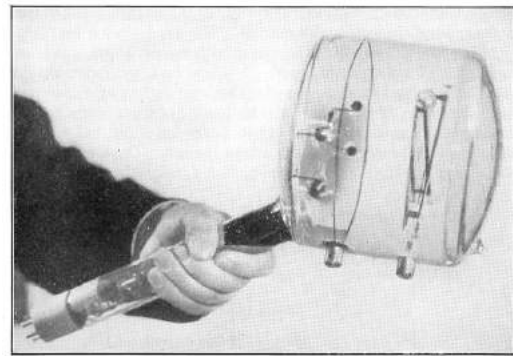


Fig. 4.14. Primer prototipo de iconoscopio. c.a. 1925

material presente en el fotocátodo y a la descomposición que suelen sufrir ante la acción térmica producida por los excesos de intensidad lumínica. Esta proporcionalidad directa entre el estímulo lumínico y la respuesta del sensor electrónico contrasta con el comportamiento más desigual y variable del material fotográfico de sales de plata, tal como se constata en la *curva característica*. Sin embargo, en favor de las emulsiones fotográficas, hay que reconocer que su comportamiento reproduce con mayor fidelidad la reacción de carácter logarítmica que el ojo humano presenta ante las distintas intensidades lumínicas.

Las características dinámicas de los dispositivos por fotoemisión hacen mención a la velocidad de expulsión o generación de electrones ante la frecuencia de la luz, que por lo general es muy elevada, llegando a fracciones del millón de segundo, dada las características de los propios electrones. Esta propiedad es de gran importancia en el caso de los tubos de imagen y en la generación de pulsos eléctricos unidireccionales, siempre que se mantiene constante la iluminación y se aplica un voltaje alterno, lo que convierte el fototubo en un rectificador de corriente<sup>16</sup>. Por último, la respuesta espectral de la fotocélula es la capacidad que tiene de discriminar luces de diferentes



Fig. 4.15. Tubo de imagen de TV, o kinescopio.. c. a. 1940.



longitudes de onda. Dependiendo del material con el que se fabricaba el fotocátodo, se obtenía una respuesta a un color u otro, tanto en el espectro visible como en el infrarrojo o el ultravioleta. Estas características diferían si el tipo de fototubo en consideración estaba fabricado al vacío, o con un gas inerte en su interior. Si bien ambos tubos presentaban los mismos rasgos físicos y, por lo general, tenían un rango de respuesta espectral parecido, los de gas adolecían de una menor linealidad y de un declive en su respuesta dinámica, especialmente en lo que corresponde a las altas frecuencias, lo que los hacía más apropiados para su uso como relés y para la reproducción de sonido, donde estas limitaciones eran menos importantes.

## 4.5. El fototubo multiplicador

En el caso del *fototubo multiplicador*, su efecto se fundamenta en el fenómeno arriba mencionado y conocido como *emisión secundaria de electrones*. Este desarrollo natural del fototubo convencional supuso un gran salto cualitativo en este tipo de tecnología, pues abrió la puerta a la detección y medición de impulsos mínimos de luz. Con ellos, se pudo incrementar substancialmente la ganancia o generación de corriente por efecto de la luz, sin un menoscabo de las características dinámicas del tubo, hasta el punto de que en su puesta en práctica saltó a relucir con más fuerza el concepto de *corriente de oscuridad*, relativa a la capacidad que tiene toda fotocélula y los fotomultiplicadores en particular, de generar impulsos eléctricos incluso en ausencia de luz. Los fototubos multiplicadores se fabricaron desde un primer momento para cubrir el espectro visible y la franja del ultravioleta, siendo prácticamente cien por cien lineales en su respuesta a este tipo de radiaciones, incluso en intensidades lumínicas mínimas, y presentando un escaso comportamiento de fatiga. El fotomultiplicador es el responsable directo del desarrollo de gran número de instrumentos científicos con un gran peso en la historia de la ciencia y la tecnología del siglo XX. Su capacidad para detectar y medir pequeñas fotocorrientes lo han convertido en una pieza imprescindible en

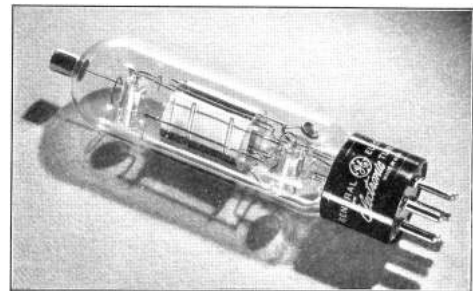


Fig. 4.16. Electrómetro de tubo.c.a.1940.

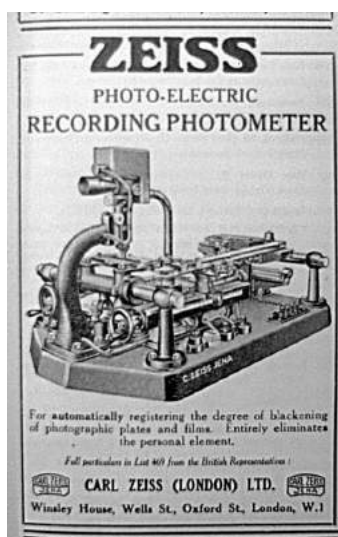


Fig. 4.17. Fotómetro fotoeléctrico. 1928.

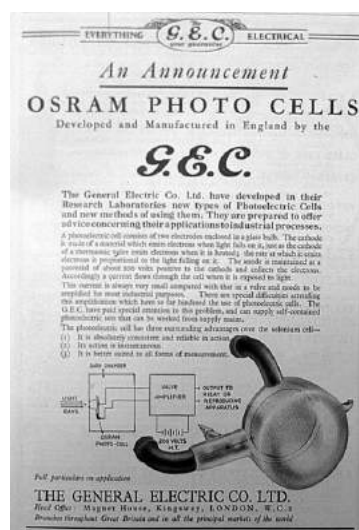


Fig. 4.18. Célula fotoeléctrica. 1929.



Fig. 4.19. Densitómetro para la medición de materiales fotográficos, plásticos, etc. 1955.



Fig. 4.20. Colorímetro fotoeléctrico. c.a. 1940.

*electrómetros*, (Figura 4.16.) instrumentos de medición de pequeños voltajes y corrientes, idóneos para la cuantificación de pulsos, medición de señales acústicas, de temperatura, etc., de gran aplicación también en fotometría; y en *exposímetros*, por medio de las diferentes células fotoeléctricas de tecnología de fototubo (Figura 4.17. y 4.18), capaces de realizar mediciones muy precisas de la luz, generales, puntuales, y en su forma especular, difusa, o reflejada. Los fotomultiplicadores supusieron también un gran avance para numerosos instrumentos que hasta entonces se regían por procedimientos esencialmente ópticos y

fotográficos, como los *densitómetros* (Figura 4.19.), *reflectómetros*, *fluorímetros* (instrumentos para la medición de los volúmenes de luz); *refractómetros*, *goniofotómetros* (para la medición de los ángulos de reflectancia), *colorímetros* (Fig. 4.20.) ( para la determinación de las distintas longitudes de onda o distribución espectral de las fuentes luminosas), *pirómetros* (instrumentos para la medición de la temperatura de los cuerpos incandescentes, tales como lámparas u hornos), etc. Una variante del electrómetro fotomultiplicador es el *contador Geiger- Mueller*, o contador por descarga en un gas (gas- discharge counter), capaz de detectar pequeñas cargas o fotoelectrones, de especial aplicación en la detección de emanaciones radioactivas. Por último, el fotomultiplicador se ha convertido también, en sus múltiples variedades, en una pieza fundamental de la *espectrometría* y de la *microfotometría electrónicas*, así como en la medición de radiaciones más allá de la franja ultravioleta, como son rayos X, neutrones, o rayos Y.

#### 4.6. El tubo de imagen o iconoscopio

El tubo de imagen o iconoscopio tiene su antecedente directo en el tubo de rayos catódicos de Braun, desarrollado en una primera versión en 1897, y en las sucesivas aportaciones que se hicieron en los años siguientes, encaminadas a encontrar técnicas más refinadas de producción de voltajes y de deflexión (deflection) controlada de los rayos catódicos<sup>17</sup>. Recordemos la labor de Jonathan Zenneck, de sus ensayos a partir de 1899 con diversos sistemas deflectores mediante el uso de campos eléctricos, y cuyos resultados recogió en placas fotográficas<sup>18</sup>. Posteriormente, en 1906, Max Dieckmann y Gustav Glage llevaron a cabo los primeros ensayos de transmisión de imágenes generadas por un tubo de Braun, haciendo uso de las radiocomunicaciones lanzadas al mercado en aquel momento por Marconi. En 1907, Boris Rosing presentó un receptor de imágenes basado en este tipo de tubo. Por último, entre 1908 y 1911, Alan A. Campbell Swinton sugirió el uso de dos rayos catódicos y de la técnica del oscilógrafo de Braun para superar las formas electromecánicas de televisión, únicas conocidas hasta entonces. Sin embargo, fue la combinación de la técnica de la radiocomunicación y de los fototubos, una vez que ambas fueron perfeccionadas a partir del final de la primera guerra mundial, la que impulsó la construcción de una televisión electrónica tal como la conocemos en la actualidad.

El tubo de imagen, o iconoscopio, fue dado a conocer en 1923 por Vladimir Zworykin como una variedad del fototubo de emisión, con la característica particular de que proporcionaba un cuadro o imagen en el cátodo, relativo a la distribución espacial de la luz o de los objetos iluminados. El mecanismo con el que

se consiguió este efecto fue separar las corrientes de electrones procedentes del fotocátodo, de tal forma que cada una de ellas produjera un efecto de acuerdo con la intensidad de luz recibida. El iconoscopio con el tiempo, fue adoptando diferentes formatos, hasta llegar a la apariencia de una cámara de televisión o de vídeo actuales. Pero la tecnología subyacente a esta variedad de formatos es la misma: un entramado de múltiples sensores y un mecanismo de lectura o de escaneado que proporcionan al final del proceso una imagen en dos dimensiones del objeto o escena captada.

La primera versión de iconoscopio incorporó un intenso campo magnético que evitaba que las corrientes de electrones salientes del cátodo y en dirección a la pantalla fluorescente, que servía de ánodo, no lo hicieran de forma irregular, sino de acuerdo a sus intensidades, y por tanto respetando su posición en el espacio. Si los electrones salientes del cátodo tuvieran una velocidad inicial igual a cero, no sufrirían ninguna desviación y llegarían a posiciones similares en el ánodo; pero al contener siempre un cierto nivel de velocidad, la llegada al ánodo o pantalla fluorescente no es puntual sino que se reparte en un pequeño *círculo o disco de confusión*. El diámetro de este círculo depende de varios factores, entre ellos, la distancia entre cátodo y ánodo, de la energía cinética de los electrones, de la *función de retención o agrupamiento* (work function), etc. Esta es la razón por la que se desarrolló la óptica electrónica como forma de intentar agrupar estos electrones o de reducir estos discos de confusión a fin de mejorar la calidad de foco y la transmisión de la imagen resultante. Mediante la utilización de determinadas lentes electrónicas, por medio de la activación de campos eléctricos y magnéticos, se fue logrando corregir deformaciones de la imagen, y lograr índices de refracción controlados, en la misma forma que se consigue con la luz y las lentes ópticas. Si el índice de refracción de un haz de electrones guarda una relación directamente proporcional con la velocidad de éstos, los campos electro-magnéticos que apliquemos pueden funcionar como elementos refringentes del mismo. En este principio descansan los fundamentos de la óptica electrónica.

Los primeros prototipos de tubo de imagen disponían de una pequeña pantalla fluorescente circular en uno de sus extremos, normalmente curvada para obtener una mejor calidad de imagen, y de una serie de aros o anillos conectados a resistencias que permitían enfocar la imagen, y que quedaban situados en el lado opuesto, perteneciente al cátodo (Figura 4.21.). Una de las grandes ventajas que presentaron estos tubos de imagen, en relación con la televisión electromecánica basada en el disco explorador de Nipkow, fue la capacidad de aumentar considerablemente los niveles de luminosidad de escenas y objetos que gozaban de niveles de iluminación mínimos, algo que no había conseguido ninguna tecnología de la imagen desarrollada hasta el momento, incluida la fotografía; y eso fue posible, gracias al desarrollo de los fotomultiplicadores. Este mismo hecho posibilitó la construcción de tubos de imagen especializados en la captación de otras franjas del espectro, en especial de la radiación infrarroja, lo que generó múltiples aplicaciones en el ámbito científico e industrial<sup>19</sup>.



Fig. 4. 21. Tubo de imagen electrostático. 1946.

Este proceso de generación y de almacenamiento de *fotocargas* (photocharges), que hace posible la lectura o escaneado sincronizado de las mismas, conforma la base de funcionamiento de toda la tecnología de tubos de



imagen y de la mayoría de los actuales sensores de estado sólido. Hasta finales del siglo pasado, los sistemas híbridos eran la norma, encontrándonos con cámaras que harían uso de tubos de imagen del tipo vidicom, y con sensores de estado sólido; en este caso, la superficie fotosensible solía ser un fotodiodo de silicio y la lectura se llevaba a cabo mediante el barrido que un haz de electrones hacía sobre dicha superficie.

#### 4.7. Las células fotoconductoras

Otro de los pilares sobre los que se edificó la ciencia de la fotoelectricidad fue el fenómeno de la fotoconducción, fenómeno que comenzó a ser estudiado una vez que fueron detectadas las propiedades fotoeléctricas del selenio. Ya vimos en capítulos anteriores<sup>20</sup> cómo la observación, acontecida de forma fortuita, del cambio que este material experimenta en sus niveles de resistencia eléctrica por la acción de la luz, abrió las puertas a la comprensión de un fenómeno que sería de vital importancia en el futuro desarrollo de la ciencia electrónica, y más en particular de los materiales semiconductores. A partir de la formulación de la teoría cuántica y de su aceptación paulatina por la comunidad científica en las primeras décadas del siglo XX, la ciencia del electromagnetismo comenzó a analizar de forma diferenciada los distintos materiales existentes, clasificándolos en conductores, aislantes y semiconductores, de acuerdo con una serie de características particulares contempladas en una escala atómica. Nuevos conceptos y términos se hicieron necesarios para poder explicar y comunicar el imbricado proceso relativo al comportamiento de los electrones en el interior de estos materiales. *Bandas de conducción, electrones de valencia, electrones libres, función de trabajo* (work function), *bandas de hueco* (band gap), *nivel de Fermi*, etc., fueron emergiendo para acometer esta empresa. Al igual que ocurre con las células fotoeléctricas por emisión, la llegada de la luz a un material fotoconductor también libera una serie de electrones, con la diferencia de que en este tipo de material, estas partículas no permanecen en la superficie sino en el interior de los mismos, cambiando su resistencia o sus características de conducción. Es decir, el aumento de electrones libres origina una reducción de la resistencia del material. Y esto se debe a que toda presencia de electrones libres en un material facilita la conducción a través de él, una vez que aplicamos un voltaje externo. A mayor cantidad de electrones libres, mayor conducción y, por consiguiente, menor resistencia. De este modo, podemos medir la intensidad de la luz que llega al fotoconductor a partir de la determinación de su nivel de resistencia.

Para comprender la diferencia que se puede establecer entre los materiales conductores, aislantes y semiconductores en relación con sus comportamientos ante la luz, y en términos de teoría cuántica, es preciso aclarar cierta terminología y ciertos procesos. Para empezar, debemos partir del supuesto básico de que toda corriente o conducción eléctrica es debida al flujo de electrones, o partículas mínimas eléctricas. Y que la magnitud de esta corriente depende del número de electrones libres, o sueltos, que se producen; en este caso, por acción de la luz. Es importante señalar en este punto, que, dado que el electrón es una parte constitutiva del átomo, su disponibilidad para ser liberado y producir una corriente depende del tipo de átomo presente en el material en cuestión, y al que el electrón está ligado. Los electrones se encuentran en diferentes niveles o estados dentro de la estructura atómica, y su comportamiento cambia, dependiendo de si se trata de un átomo aislado o de un conjunto de ellos, formando una molécula o una estructura cristalina. Cuando se trata de un sólido, la proximidad que se da entre los átomos hace que los niveles de energía en el interior de los mismos no se dé en *quantos* o a saltos, sino que se produce un trasiego entre ellos a lo largo de una serie de *bandas* en las que se sitúan los electrones. Las propiedades eléctricas de



un material sólido dependen de esta estructura electrónica en bandas, que pueden presentar distintas configuraciones. Por un lado, tenemos las *bandas de energía*, que son las que presentan los electrones que se encuentran en un átomo aislado, donde quedan repartidos en diferentes *substratos* (shells), siendo la capa más externa la que cuenta con los electrones más activos. Si los átomos se encuentran más próximos, como ocurre en los cristales y otras formas de sólidos, los electrones tienen la posibilidad de ocupar diferentes bandas, como las *bandas de valencia*, o bandas consideradas con el nivel más alto de estado de equilibrio; las *bandas de conducción*, que no están ocupadas normalmente por los electrones; y las *bandas de hueco* (band gap), o lugares donde los electrones no pueden estar, y que tienden a desaparecer en cuanto la proximidad de los átomos es muy acentuada. La distribución de los electrones de valencia, que son los que se encuentran en las órbitas más externas del átomo, y la presencia o no de bandas de hueco entre las de *valencia* y las *conductoras* son las que determinan si el material es conductor, semiconductor o aislante.

Dentro de este complejo esquema, resalta también una serie de conceptos que intervienen en el proceso de la conducción por acción de la luz, como la *función o umbral de trabajo* (Work function), que es la energía necesaria para liberar un electrón del material en cuestión, y que depende de la frecuencia o color de la luz incidente. En los fotoemisores, el fotón puede decirse que arranca un electrón de la superficie del material y lo libera, produciéndose el efecto fotoeléctrico. Por el contrario, si permanece en el interior del mismo, se produce el fenómeno de la fotoconducción. La *eficiencia cuántica* de este proceso, ya lo hemos visto, es la razón entre la cantidad de electrones generados y el número de fotones incidentes. La *energía o nivel Fermi*, hace mención a la energía relativa al estado cuántico completo más alto dentro de una banda, siendo el nivel que un electrón debe sobrepasar para poder fluir libremente y posibilitar así la conducción en un material.

Curiosamente, a pesar de la complejidad teórica que rodea la interpretación del mecanismo de la fotoconducción, la construcción de una simple célula fotoeléctrica fundamentada en estos principios, tan sólo precisa de dos electrodos conectados a un material semiconductor. Ese fue el procedimiento que se utilizó desde un principio, tan pronto como fueron detectadas las propiedades del selenio. El desarrollo de otros tipos de fotocélulas, como las fotovoltáicas o los fototubos, retrasó la puesta en práctica de las fundamentadas en estos procedimientos. Con el tiempo, se comprobó que el selenio era un elemento más, y no el más idóneo, dentro del amplio abanico de materiales susceptibles de ser utilizados como fotoconductores. A partir de los años veinte, se comenzó a desplazar el uso del selenio en la fabricación de células fotoconductoras por materiales como el sulfuro de talio, normalmente depositado en válvulas al vacío para conseguirse una mayor sensibilidad y mayor rapidez de respuesta (Figura 4.22.). La mayoría de las células fotoeléctricas construidas en la actualidad bajo este principio, y que son utilizadas como herramientas fotométricas de ayuda a los fotógrafos, son fabricadas con otros materiales como el sulfuro de cadmio, el selenuro de cadmio o de plomo. Normalmente, estos compuestos se depositan en películas finas sobre materiales aislantes del tipo cuarzo o de sustrato cerámico, y se dopan o mezclan con una serie de impurezas para conseguir un mayor control de las características fotosensibles del material resultante. Las células fotoeléctricas fotoconductoras reciben a veces en la

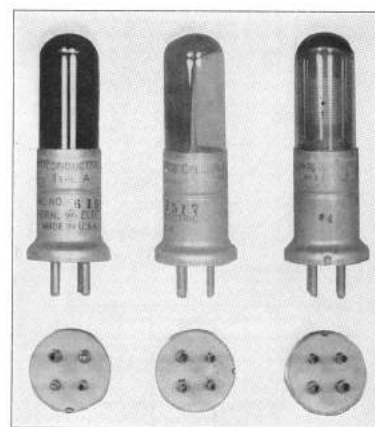


Fig. 4.22. Células fotoconductoras de sulfuro de talio.

jerga técnica, el nombre de *fotorresistores* (Photoresistors). Su uso ha estado muy extendido en el campo de la fotografía, como pieza esencial de los fotómetros, especialmente en aquellos integrados en las cámaras fotográficas. Pero, por lo general, ofrecen menor calidad que las células fotovoltaicas construidas con selenio o silicio, dado su menor eficiencia cuántica y mayor lentitud de respuesta.

#### 4.8. Las células fotovoltaicas

En el caso de las células fotovoltaicas, la acción de la luz sobre el material fotosensible produce un voltaje eléctrico, como resultado de una separación de las cargas. A diferencia de las anteriores, que necesitan de un voltaje externo para ser operativas, éstas son autosuficientes al generar su propia corriente. O sea, la luz incidente en uno de los electrodos, normalmente el cátodo, origina una diferencia de potencial entre ambos. En un principio, y como resultado de las experiencias de E. Becquerel<sup>21</sup>, su construcción fue mediante un baño electrolítico por lo que se denominaron húmedas; pero el avance en el estudio de los materiales semiconductores a principios de los años veinte, dio paso a la construcción de las células secas, mucho más prácticas y eficientes. Las más afamadas en la actualidad son las células solares que convierten directamente la luz solar en energía eléctrica; sin embargo, su aplicación en el campo de la fotografía, especialmente en la construcción de diversos tipos de fotómetros, es conocida por todos los practicantes de esta técnica. El material semiconductor más utilizado en un principio fue el selenio, pero pronto se sumó el silicio, que junto con el oxígeno, es el material que se encuentra en mayores proporciones en la naturaleza. Las células fotovoltaicas de selenio, también conocidas como de *capa barrera* (Barrier-layer cell), comenzaron a fabricarse a principios de la década de los treinta principalmente para su uso en fotometría fotográfica (Figuras 4.23. y 4.24), aunque las propiedades fotovoltaicas de este material se conocieron desde 1876, poco tiempo después de descubrirse las propiedades fotoconductoras del mismo. Las de silicio se desarrollaron en 1954 en los laboratorios Bell, siendo más eficientes que las anteriores por su mayor capacidad para convertir la energía lumínica en energía eléctrica, y debido a su sensibilidad en una franja más amplia del espectro. La ventaja de las primeras sobre estas últimas viene dada por la estructura policristalina del selenio, lo que permite fabricar células de gran tamaño; mientras que el silicio, al ser monocristalino, condiciona el tamaño de las células al tamaño de sus cristales.

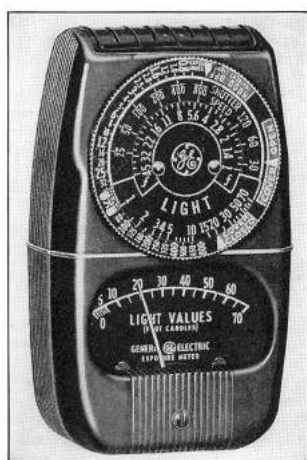


Fig. 4.24. Fotómetro para fotografía con célula de selenio. c.a.1940.

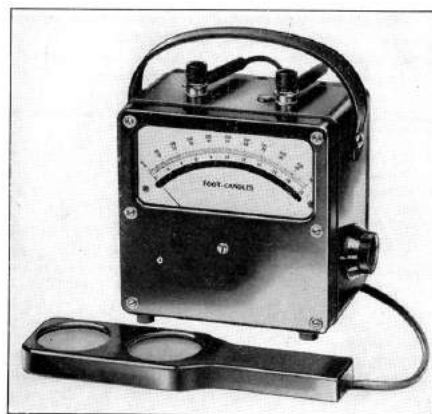


Fig. 4.23. Fotómetro de célula de selenio. c.a.1940.

Las células de selenio tuvieron mucha aceptación por contar con una sensibilidad espectral muy próxima a la del ojo humano, por no ser afectadas por los cambios de temperatura y por su estabilidad de respuesta en periodos de tiempo muy largos. Su aplicación ha sido fundamentalmente en la construcción de fotómetros y dispositivos de relés. (Figura 4.25).

La fotoelectricidad cuenta hoy día con una amplia variedad de aplicaciones, en las que destacan las de uso industrial, especialmente a través del desarrollo de dispositivos de control, de seguridad, autorreguladores, o de teledetección. En el ámbito de la imagen electrónica, su alianza con los métodos informáticos ha abierto una nueva era caracterizada por una nueva ciencia de la imagen en la que predominan conceptos como procesamiento de imagen, visión computerizada, visión artificial y computacional, máquina -visión, o reconocimiento de imágenes. El conocimiento tan preciso al que se ha llegado sobre el comportamiento y las características electromagnéticas de los distintos materiales, especialmente de los semiconductores, y sobre las estructuras lógicas que cobran sentido con redes y circuitos de igual composición, es el que está permitiendo niveles de automatismo cada vez mayores que afectan al conjunto de las actividades humanas, incluida la captación y reproducción de imágenes artificiales.



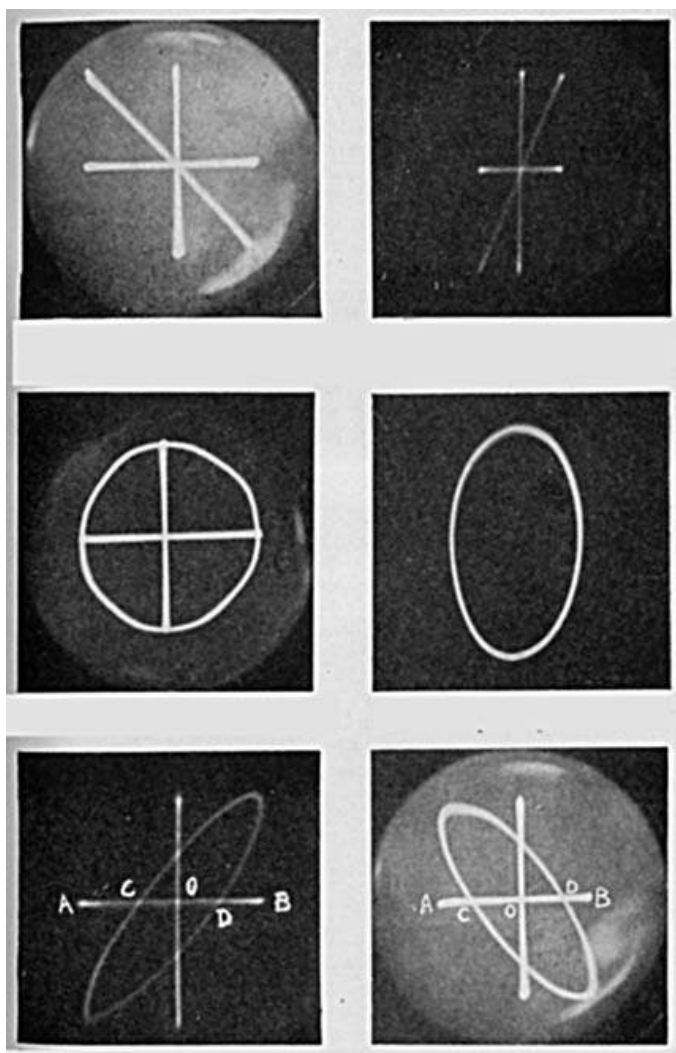
*Fig. 4.25. Célula Weston Photronic, de barrera de capa de selenio. c.a.1940.*

#### 4.9. El osciloscopio

El osciloscopio es un instrumento fundamental en el proceso de formación de la imagen electrónica. Utilizando el símil del lenguaje humano, se puede afirmar que si las figuras de Lichtenberg pertenecen a un primer estado de formación de la iconografía electrónica, cuyas imágenes se manifiestan de forma natural y primitiva, a semejanza de un sonido gutural, onomatopéyico; o si las primeras sombras formadas por los objetos emplazados por Hittorf y Crookes en el camino del haz de electrones proyectado en el interior de un tubo de vacío, se pueden asimilar a los primeros balbuceos ininteligibles de un niño, las figuras conseguidas con el osciloscopio constituyen los primeros signos de puntuación de un nuevo lenguaje. Serían como las primeras sílabas inconexas, escritas sobre el primer papel en blanco, en este caso fluorescente, a modo de primeros garabatos, a veces de trazos precisos y regulares, otras esquivos y tortuosos, como fiel reflejo del trazado marcado por las oscilaciones eléctricas (Figura 4.26.). Las líneas rectas y curvas, en forma de sierra, de círculos, diagonales, elipses, corazones, ondas sinusoidales, lazos, rúbricas, cruces, estrellas ... formadas por la deflexión del rayo de electrones, fueron las precursoras del tropel de palabras que se avecinaba con la nueva instrumentación electrónica de captación y reproducción de imágenes, especialmente la televisión y el microscopio electrónico.

El osciloscopio forma parte del desarrollo natural del tubo de vacío, cuyos orígenes encontramos en los primeros experimentos de Geissler en 1855, y del tubo de rayos catódicos, en particular el de Ferdinand Braun, que data de 1897. En estas fechas, la necesidad de idear un instrumento que posibilitara la visión de los fenómenos oscilatorios y fugaces propios de la electricidad era más que evidente. La instalación de centrales y de plantas eléctricas en las grandes ciudades fue un hecho muy significativo para el progreso de la humanidad al potenciar la aparición de numerosas máquinas y utensilios en los que la electricidad formaba parte inexcusable: turbinas y dinamos para la producción de energía eléctrica, ascensores, hornos de arco eléctrico de fundición del acero, ferrocarriles eléctricos, incluso un primer prototipo de automóvil desarrollado por Siemens, lámparas incandescentes, teléfonos y centrales de conmutación telefónica, procesos electrolíticos para la fabricación del aluminio, la electrificación del tráfico, el





*Fig. 4.26. Fotografías de los trazos generados por un osciloscopio. 1954.*

alumbrado eléctrico de las ciudades, transformadores de corriente de alta tensión, motores eléctricos de corriente alterna, tendido de líneas de alta tensión, etc.<sup>22</sup> A mediados de los ochenta, la Westinghouse comenzó a poner en práctica las plantas de generación de corriente alterna, cuyos cambios de polarización continuados presentaban serios problemas para su medición. Hasta 1889, no se ofreció una teoría explicativa y completa de este tipo de corriente. La única forma de representar el comportamiento de las corrientes alternas, su forma sinusoidal, sus fases, los ángulos relativos a la posición del eje del alternador, etc., era por medio de múltiples lecturas de los voltajes, llevadas a cabo con voltímetros, y teniendo en cuenta los ángulos formados por el eje del alternador. Posteriormente, se llevó a cabo con espejos giratorios y vibratorios que lograban proyectar un haz de luz sobre una pantalla fluorescente<sup>23</sup>, del mismo modo que vimos en las figuras de Lissajous (ver Figuras 2.51, 2.52 y 2.53) (ver Cap. 2.7). Este tipo de oscilógrafo electromecánico consiguió

representar las oscilaciones por medio de un pequeño espejo acoplado a la bobina móvil de un galvanómetro encargado de reproducir las vibraciones de la corriente. El haz de luz proyectado sobre el espejo, y reflejado en otro dispuesto en ángulo recto, terminaba por ser recogido en una pantalla, en un papel pigmento o en una placa fotográfica (ver Figura 2.58). El problema surgió cuando los alternadores comenzaron a producir ciclos a una velocidad superior a la que podían reproducir este tipo de dispositivos, porque en pocos años, de 50 o 60 ciclos por segundo se pasó a producir entre 5.000 y 10.000 ciclos por segundo, especialmente por las necesidades de transmisión de las nuevas telecomunicaciones inalámbricas.

Esta demanda de la ingeniería eléctrica fue la que incitó a Braun a estudiar el posible uso de la tecnología de los tubos de vacío para la puesta en práctica de un instrumento de visualización de los fenómenos oscilatorios y transitorios de los circuitos eléctricos. El tubo de rayos catódicos apareció en este contexto como un instrumento ideal para mostrar el comportamiento de las ondas, dado que por aquellas fechas ya se conocía el modo de aislar el haz disperso de electrones que se originaba en el cátodo mediante el uso de diafragmas. También se conocía la forma de desviarlos con la presencia de determinados campos magnéticos y eléctricos colocados a su paso, y la forma de ser visualizado por medio de una pantalla de mica bañada en fósforo. El destello final en la pantalla en forma de un



punto luminoso, que iba adoptando diferentes posiciones y movimientos, reproducía las oscilaciones relativas a los voltajes aplicados en estos campos en función del tiempo.

*En realidad, un instrumento así, fue tan esencial para la ciencia eléctrica, como lo fue en otros campos el telescopio, el microscopio o el espectroscopio .<sup>24</sup>*

El procedimiento básico ideado por Braun entre 1896 y 1897, consistió en hacer pasar la corriente que se quería observar a través de una bobina colocada junto al diafragma, de manera que su campo magnético producía las correspondientes desviaciones del rayo fino de electrones en su camino hacia la pantalla de visualización. Una vez producido el destello, un espejo giratorio se encargaba de reproducir en un plano de dos dimensiones las correspondientes figuras que iban formándose. La velocidad del espejo era representativa del factor tiempo, responsable a su vez de que el trazado de la figura fuera representado en el plano horizontal de la pantalla. Posteriormente, Braun sustituyó el espejo por un imán que se hacía rotar justo debajo del tubo. Y paralelamente, fue estudiando el comportamiento de estas figuras, observando cómo la intensidad lumínica de los destellos estaba en relación directa con la velocidad del movimiento del rayo, y cómo se iban formando una serie de patrones representativos de las frecuencias de las corrientes. Un paso decisivo en esta dirección, fue cuando añadió una bobina de deflexión adicional, que colocó en ángulo recto respecto de la primera. De esta forma, pudo estudiar el comportamiento de dos corrientes al unísono, comprobando el estado de sus fases, sus amplitudes, o sus frecuencias a partir de las figuras mostradas. Las diferencias de fases, expresadas en ángulos, se traducían en círculos, elipses, o líneas oblicuas. O la presencia de resistencias, condensadores, u otros elementos eléctricos añadidos al circuito, se traducían en figuras dentadas o distorsionadas. El *tubo indicador* de Braun, tal como fue denominado en su día, sufrió continuas mejoras en los años sucesivos, especialmente por su discípulo Jonathan Zenneck, que logró sustituir los métodos de barrido utilizados hasta entonces por medio de espejos o de imanes rotatorios, con la producción de una señal adicional encargada de escanear o borrar en el tiempo el trazado previo del rayo cada vez que concluía un ciclo. Los resultados de estas experiencias, tal como se comentó en capítulos anteriores. (ver Cap. 2.7.1.), fueron registrados por medio de fotografías, antecedente directo de los primeros oscilógrafos. El oscilógrafo, con el tiempo, absorbió el significado general de este instrumento aunque, en honor a la verdad, se trata de una variedad del osciloscopio con la característica particular de que permite el registro fotográfico o electrofotográfico de las imágenes que se producen normalmente en pantallas fluorescentes.

En la primera década del siglo XX, confluyeron las tecnologías electrónicas del tubo de rayos catódicos y de la válvula termoiónica, dos tecnologías muy próximas en concepción y apariencia, y que representan dos puntas de lanza del desarrollo científico de gran parte del siglo XX. El corazón del osciloscopio es el tubo de rayos catódicos<sup>25</sup>. Y la válvula ocupa un lugar muy próximo a éste al ser parte esencial de la instrumentación electrónica, tanto científica como industrial, utilizada por las radiocomunicaciones y la informática, dos áreas íntimamente relacionadas con la transmisión y procesamiento de las imágenes. El desarrollo del osciloscopio fue asimismo fundamental en el desarrollo de la óptica electrónica, ya que gracias a él se demostró que los haces de electrones podían ser tratados de la misma forma en que la óptica convencional trata la luz. Los niveles de brillo y de foco del rayo de electrones generado por el cátodo, se controlaron con gran precisión mediante el uso de los campos magnéticos y eléctricos, dando como resultado imágenes más nítidas, libres de distorsión y susceptibles de ser observadas y fotografiadas.

Es importante señalar al respecto que el osciloscopio es un instrumento donde la imagen adquiere unos valores cuantitativos y de medida muy precisos.

*Astigmatismo en el tubo de rayos catódicos, significa que el punto de luz, cuando está lo más enfocado posible, no es más o menos circular, sino elíptico.*<sup>26</sup>

La información que provee el osciloscopio es fundamentalmente sobre las señales eléctricas relativas a algún fenómeno físico en relación con el tiempo. La información, por tanto, suele ser de carácter analógico. En el eje horizontal, o de abscisas, queda representado el tiempo, y en el vertical la amplitud de la señal. En la actualidad, los oscilogramas resultantes pueden ser interpretados numéricamente con procedimientos digitales manuales o automáticos. Normalmente la información aparece en una pantalla fluorescente, pero con la posibilidad de ser registrada a un mismo tiempo en papel fotosensible o en película fotográfica. Con la llegada de los ordenadores, las señales comenzaron a ser digitalizadas mediante escáneres lectores de señales ópticas o electrónicas, pudiendo ser almacenadas en tarjetas perforadas, cintas magnéticas u otros soportes de memoria.

Para registrar los trazos producidos por los osciloscopios se han utilizado varias técnicas a lo largo de la historia. Las primeras, comentadas anteriormente, fueron las derivadas de los primeros ensayos de Braun, mediante el uso de grabadores por rayos de luz y de espejos- galvanómetros diminutos y espejos rotatorios. Los primeros estaban destinados a traducir el impulso de luz original en trazos de acuerdo a su intensidad, y los segundos para representar el tiempo. Este tipo de registradores podían grabar hasta 60 canales a un mismo tiempo. Los trazos resultantes eran recogidos normalmente en papel común, sin procesos químicos, en papel o película fotográficos que requerían ser procesados posteriormente, o por procedimientos electrofotográficos. Sin embargo, pronto se puso en práctica fotografiar directamente la acción directa del haz de electrones tal como se manifiesta en la pantalla fluorescente. Para ello, las pantallas sustituyeron el uso de la willemita, que era el compuesto más utilizado, por el sulfuro de cinc, que proporciona resultados de más brillo y de mayor perdurabilidad, haciéndolo más apropiado para la fotografía. Este procedimiento perduró hasta bien entrada la década de los sesenta, hasta que fueron paulatinamente reemplazados por las técnicas de grabación directa en los soportes de memoria de los ordenadores. Hasta entonces, fue el sistema más rápido y eficaz, por permitir la observación de los trazos directamente en la pantalla o en el soporte fotográfico para un estudio posterior y más detallado de las señales.

*Llegados a este punto, podemos ofrecer una pista útil para fotografiar estas figuras. Al ser utilizados dos osciladores independientes, es imposible obtener imágenes absolutamente fijas, más si cabe, cuando en realidad se encuentran en continuo movimiento. Se precisa, por tanto, exposiciones de menos de un segundo para obtener fotografías útiles. Los oscilogramas que se adjuntan (Figura 4.26.), están realizados con procedimientos estroboscópicos, abriendo el obturador durante un instante, una vez que la imagen ha llegado a un punto predeterminado, y realizando un número concreto de exposiciones en cada una de ellas. Como es imposible obtener una sincronización perfecta de esta manera, es por lo que los trazos de algunas de las ilustraciones no son todo lo limpios que cabría esperar.*<sup>27</sup>

La alianza entre osciloscopio y fotografía dio resultados muy fructíferos hasta la década de los setenta del siglo XX, estableciendo una combinación de tecnologías ampliamente utilizada en los laboratorios y en la industria. Las aplicaciones más comunes fueron en el estudio del comportamiento de los diferentes dispositivos eléctricos, como tubos electrónicos, receptores, circuitos, medida de tensión, de impedancia, o de tensiones internas relativas a ensamblajes metálicos, piezas de fundición, estructuras, etc., o para medidas de vibración. Dado que multitud de fenómenos naturales, incluidos los relativos a los procesos fisiológicos animal y humano, son susceptibles de ser traducidos a impulsos eléctricos, el oscilógrafo ha posibilitado un estudio esmerado de todos ellos. En el ámbito de las radiocomunicaciones su presencia ha sido fundamental, especialmente para hacer posible la visualización del estado y la dinámica de los distintos dispositivos eléctricos presentes en los circuitos y en los equipos de transmisión, o en instrumentos como el radar o el sonar, y en técnicas muy próximas a éstas, como las de ultrasonido; o en la tecnología de generación de pulsos, consustancial a todo este tipo de tecnologías.

El osciloscopio rápidamente se convirtió en un instrumento imprescindible en los laboratorios científicos y en los diversos talleres industriales para la observación de los fenómenos eléctricos producidos en multitud de experimentos y aplicaciones. En el ámbito científico, el recuento de este tipo de experiencias rayaría en el infinito. Sirvan de ejemplos, el descubrimiento de la fisión del átomo en 1939, cuya noticia se propagó rápidamente entre la comunidad de científicos, incitando a muchos de ellos a repetir la experiencia, observando con sus propios ojos y con la ayuda de los osciloscopios los fragmentos ocasionados por la fisión<sup>28</sup>. O la propuesta de Max Born y sus colaboradores de utilizar este tipo de instrumentación, conjuntamente con las células fotoeléctricas, para poder realizar un cálculo automático y observar directamente la transformada de Fourier relativa a una serie de oscilaciones<sup>29</sup>.

El hecho de que las imágenes de los osciloscopios se correspondan normalmente con movimientos muy rápidos de los fenómenos medidos, ha favorecido su alianza con la fotografía, por permitir ésta la fijación de instantes muy concretos; o con la cinematografía y el vídeo, por su capacidad de grabar secuencias completas de las señales. Esta aplicación tan relevante para el estudio de los fenómenos en movimiento, coincidió en fechas con las primeras grabaciones de películas cinematográficas realizadas con el primer iconoscopio de Zworykin, convenientemente transmitidas y reproducidas por medio del kinescopio. Tanto en el caso de la fotografía como de la cinematografía, la industria del momento desarrolló múltiples dispositivos e instrumentos mixtos que favorecieron la integración de estas dos tecnologías con los resultados proporcionados por el osciloscopio. Desde máquinas construidas específicamente para la grabación cinematográfica de las señales, tanto en película de 35 mm como de 16 mm (Figura 4.27. y 4.28.), a cámaras fotográficas de pequeño y medio formato, e incluso polaroid, especializadas en el registro de este tipo de imágenes (Figuras 4.29., 4.30., y 4.31), o mediante acopladores que podían ser utilizados con cámaras convencionales (Figuras 4.32. y 4.33.); así como lentes especiales para el registro de los movimientos ultra-veloces de las señales (Figura 4.34.). Es importante señalar que esta combinación de tecnologías aplicada al estudio del movimiento, ha sido decisiva en el establecimiento de una disciplina de tanta relevancia hoy día como es la tecnología de generación y registro de pulsos eléctricos y ópticos



*Fig. 4.27. Aparato para el registro cinematográfico en 35 mm y 16 mm, de las señales de un osciloscopio.1947.*



(Figuras 4.35. y 4.36.). No menos importante ha sido su función como dispositivo disparador en prácticas de fotografía de alta velocidad. (ver Cap. 6.3.3.)



Fig. 4.28. Aparato cinematográfico para registrar las señales de un T.R.C. 1948.



Fig. 4.29. Oscilógrafo con cámara fotográfica. 1951.



Fig. 4.30. Registro de señales de un osciloscopio en película fotográfica. 1957.

La aparición de la tecnología láser en la década de los sesenta, supuso un avance en estas técnicas de registro de señales, al sustituir el haz de electrones por un rayo de estas características. La llegada de los ordenadores, a partir del final de la segunda guerra mundial, abrió una etapa de transición en este tipo de tecnología, caracterizada por el uso conjunto de los soportes magnéticos y de las



Fig. 4.31. Cámara Polaroid para acoplar a osciloscopio. 1962.



Fig. 4.32. Equipo para fotografiar señales de un osciloscopio. 1953.

emulsiones fotográficas convencionales, para el registro y almacenamiento de los datos y señales. En este contexto, se desarrollaron sistemas mixtos en los que se utilizaron cintas magnéticas para la grabación digital de datos generados por ordenadores, que eran transferidos, en ocasiones, a películas de microfilm, o de 16 mm. Este tipo de registro combinado de señales se llevó a cabo también con imágenes de TV, de pantallas de radar, terminales de ordenadores, y de fotocomposición. La técnica fotográfica logró especializarse, produciendo una serie de materiales específicos para estos fines, en cuanto a velocidad y sensibilidad de las emulsiones, teniendo en cuenta factores como los grados de apertura necesarios, la franja espectral del fósforo presente en las pantallas, o la rapidez de los destellos y de los trazos. De este modo, la industria de la época desarrolló placas, películas de gran formato, rollos, polaroid, papel fotográfico especial, y microfilm, en tamaños estándares de 16, 35 y 70 mm; y en distintos soportes, como poliéster o acetato de celulosa; normalmente recubiertos con película anti-halo de mayor grosor, para contar con una mayor resistencia; y en material mate, con márgenes suficientes para poder hacerse anotaciones o trazos en sus superficies. Los procesos de revelado se automatizaron con el tiempo, de manera especial con los procesamientos en seco por medios térmicos, técnica que comenzó a imponerse mayormente en las tareas de registro y almacenamiento de datos de ordenadores, de televisiones, o de monitores



Fig. 4.33. Oscilógrafo con cámara fotográfica. 1948.





**Fig. 4.34. Lente para registrar señales de alta velocidad; y fotografía captada en la pantalla de un osciloscopio. 1948.**

asociados a sistemas de impresión, de fotocopiado, de microfilm, o a instrumentación científica, tal como espectroscopios de diversa índole<sup>30</sup>. El papel *Linagraph*, de Eastman Kodak, en rollos de gran formato, que tanto recuerda al procedimiento monocromático del colotipo, fue uno de los procedimientos en seco más utilizados en este contexto científico hasta fechas muy

recientes, en las que comenzó a ser sustituido por los ordenadores personales y las impresoras portátiles asociadas a este tipo de instrumentación.



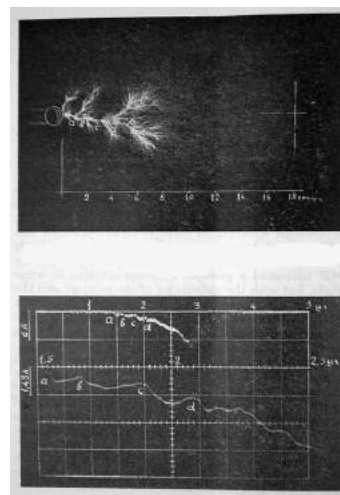
**Fig. 4.36. Osciloscopio con generador de pulsos de microsegundos, especial para producción de fotografías. 1953.**

El desarrollo natural del osciloscopio condujo a la invención de la televisión electrónica. Una vez, que el haz de electrones es dirigido en forma de barrido hacia el cátodo, donde es recogida la información relativa a la luminosidad presente en la escena, es posible almacenar, transmitir y reproducir sus resultados en un receptor de televisión, que no deja de ser una forma especial de osciloscopio. Adicionalmente, el osciloscopio fue decisivo como instrumento de medición y observación a la

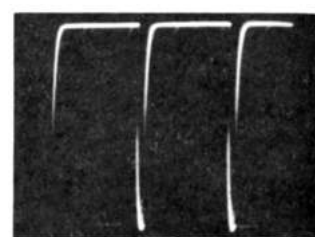
hora de la creación y perfeccionamiento del sistema televisivo, especialmente en lo relativo a las funciones de producción, transmisión y recepción de las señales de vídeo y audio, procesos fundamentados en la generación de sincronismos, en las oscilaciones de líneas generadas por los amplificadores, o en la producción de cuadros o fotogramas. La presencia o no de ruido, de interferencias, distorsiones, o la falta de sincronización de las señales, etc., han sido fenómenos fácilmente observables con la ayuda de este versátil y poderoso instrumento. (Figura 4.37.)

#### 4.10. Electrones en perspectiva: del iconoscopio a la televisión

En la segunda década del siglo XX, se encontraban dispuestos todos los elementos tecnológicos que hicieron posible la aparición de la televisión tal como la conocemos en nuestros días. El tubo de rayos catódicos, las células fotoeléctricas, las pantallas fluorescentes, y la tecnología de radiocomunicación; y los dispositivos electromagnéticos necesarios para el control del haz de electrones, y para la amplificación, modulación y sincronización de pulsos y señales, estaban lo suficientemente desarrollados como para que los primeros ensayos se fueran produciendo. La imagen electrónica consiguió con este descubrimiento su mayoría de edad, entrando a formar parte, junto con la fotografía y el cine, de la



**Fig. 4.35. Fotografía de descargas, y señal producida en un oscilógrafo. 1962.**



**Fig. 4.37. Figuras de osciloscopio correspondientes a pulsos de sincronismo correctamente separados de las señales de vídeo. 1954.**

instrumentación científica regida por imágenes construidas sobre la base de un espacio racionalizado, dictaminado por los principios de la óptica y la perspectiva. Siguiendo con el símil del lenguaje humano aplicado en el capítulo anterior a las diferentes formas de imagen electrónica, la televisión fue la responsable de la formación de las primeras palabras constituyentes del habla iconográfico electrónico; consecuentemente, de las primeras frases, párrafos y discursos visuales, en la misma forma que lo habían hecho anteriormente la fotografía o el cine en el ámbito de la imagen fotoquímica.

El hecho de que la tecnología de la televisión haya seguido desde su nacimiento las exigencias dictadas por su aplicación más fundamental, que es en el ámbito de la comunicación de masas, como vehículo para la información, la educación, o el entretenimiento, ha supuesto tradicionalmente una seria limitación a su potencialidad como instrumento científico. A ello se añade, que la televisión formara parte desde un principio, de un nuevo modelo industrial, instaurado a principios del siglo XX, caracterizado por la producción a gran escala, coincidiendo con la entrada en acción de los laboratorios pertenecientes a grandes corporaciones. El modelo personalizado y casi artesanal de hacer ciencia, que había imperado durante el siglo XIX, fue desapareciendo paulatinamente, coincidiendo con el desarrollo de una nueva instrumentación científica, entre ella la televisión, que necesitó de ese entramado industrial ciclópeo para poder producirse. A partir de estas fechas, los científicos pasaron a depender en gran medida de la comercialización masiva de este tipo de instrumentos, que normalmente salía al mercado para satisfacer la demanda de un gran público y para amortizar, a un mismo tiempo, los gastos pertenecientes a investigación e infraestructuras. La etapa de fabricación artesanal de los instrumentos, hechos a medida por cada científico y específicamente contruidos para cada montaje en particular, comenzó a remitir. En el caso de la televisión, por ejemplo, los niveles de resolución y contraste de sus imágenes, o sus características técnicas más generales, se establecieron desde un principio de acuerdo con las necesidades de amplios colectivos sociales y de la nueva industria eléctrica y mediática; secundariamente, para complacer fines científicos.

*Si se comprueba que una aplicación (científica) muy especial requiere modificaciones de uno o de dos de los modelos de cámara más económicos, encontramos que no hay ningún fabricante que esté interesado en suministrar dicho equipo. Esto es debido a que el precio de venta del equipo es muy bajo como para cubrir los gastos laborales de un ingeniero asignado al problema.<sup>31</sup>*

No obstante, la amplia versatilidad que ofrece este medio en cuanto a adquisición, tratamiento, reproducción, almacenamiento y transmisión de imágenes, permitió que se convirtiera con los años en un instrumento ampliamente utilizado en el terreno científico. Siguiendo el esquema de Shackel y Watson<sup>32</sup>, sus múltiples aplicaciones en el terreno científico pueden ser agrupadas en una serie de apartados correspondientes a sus diferentes capacidades y características técnicas. De este modo, sus cualidades más notorias se resumen en: a) *transmisión*, entendida como la facilidad que tiene este medio para poder desligar el observador de la escena observada. La observación a distancia, es un elemento novedoso en la instrumentación científica, que supera las prestaciones de la fotografía o del cine, y que hace innecesaria la presencia directa del observador junto al instrumento y el fenómeno observado. Esta cualidad se traduce en múltiples ventajas a la hora de visualizar objetos o escena inaccesibles, tanto por su lejanía, incomodidad, peligrosidad o inmanejabilidad. Tal es el caso de la observación de fenómenos radiactivos, térmicos o tóxicos, de determinados

comportamientos animales y humanos, del funcionamiento interno de organismos y máquinas, de objetos emplazados en zonas remotas, como pueden ser fondos marinos o espacios intergalácticos, etc.; hechos que ponen de relieve una capacidad adicional, consistente en poder mostrar en vivo y en directo los fenómenos observados. b) *ampliación*, como resultado de su alianza con instrumentos de aumento de imágenes, como pueden ser los distintos tipos de microscopios, tanto ópticos como electrónicos, los endoscopios, o mediante el uso de lentes macro acopladas a su propio sistema óptico. c) *multiplicación*, o capacidad para que sus imágenes puedan ser observadas por distintos observadores, desde distintas posiciones o lugares y en directo. d) *transformación*, entendida como la captación y reproducción de imágenes traducibles al espectro visible, como las originadas por las radiaciones ultravioleta, infrarrojos o de rayos X, lo que permite el estudio de fenómenos en condiciones mínimas de iluminación, e inaccesibles a la visión humana. e) *almacenamiento y memoria*: las imágenes de televisión son susceptibles de ser registradas para un uso futuro. Originalmente, tenían que ser almacenadas en formato fotográfico y cinematográfico, lo que generó toda una tecnología al respecto; posteriormente se desarrollaron las cintas y discos magnéticos, que han sido los soportes más utilizados hasta nuestros días. f) *comparación*, o capacidad que tiene la imagen vídeo para ser superpuesta, acumulada, o de ser mostrada en diferentes ventanas para su análisis comparativo, cualidad que se ve potenciada con el posible uso de diferentes canales de color para poner de manifiesto las diversas cualidades de cada imagen a través de la acentuación del contraste, el brillo, o la tonalidad de alguna de ellas. g) *integración*, o capacidad del sistema para acumular de energía luminosa traducible en energía eléctrica. Esto permite un efecto fotomultiplicador, como resultado de sumar durante un cierto período de tiempo el flujo radiante de cuerpos con niveles de luminancia mínimos; como puede ser el caso de estrellas remotas. Y h) *análisis*, que parte del hecho de que las imágenes electrónicas se deben a un conjunto de señales eléctricas que pueden ser descompuestas en sus partes más básicas, y por tanto, reagrupadas o manipuladas con relativa facilidad, cualidad que las hace idóneas para el análisis de patrones, discriminación de objetos, detección de determinados rasgos, etc.

Estas cualidades del sistema televisivo ponen en evidencia que en él se encuentra el germen de todo el desarrollo de la imagen electrónica posterior. Los principios básicos que rigen la formación de la imagen televisiva se mantienen con gran vigencia hasta nuestros días, expandiéndose a la actual imagen electrónica digital. Es más, el análisis y la integración, presentes en este sistema de producción de imágenes, se encuentran hoy plenamente desarrollados en la tecnología digital, especialmente en el ámbito de la detección y reconocimiento de imágenes. Todo este desarrollo de la imagen electrónica ha sido posible gracias al bagaje de experiencias acumuladas durante la primera mitad del siglo XX, período en el que se produjo una convivencia muy estrecha entre las diferentes formas de imagen tecnológica. En este sentido, es conveniente analizar el proceso histórico que ha acompañado la gestación de este tipo de tecnología, parte integrante de la ciencia de la fotoelectricidad. Recordemos que el primer proceso fotoeléctrico que dio lugar a la formación de una imagen de televisión electrónica fue el de fotoconducción, y que dentro de los materiales fotoconductores, cuya propiedad básica es el cambio de resistencia por la acción de la luz, hay que incluir las células fotodetectoras empleadas en los tubos de rayos catódicos del sistema televisivo. El fenómeno de la fotoconducción, junto con el de fotoemisión, ampliamente comentados en estas páginas, se encuentran en la base del funcionamiento de la mayoría de las tecnologías electrónicas de adquisición y producción de imagen.

En capítulos anteriores (Ver Cap. 2.7.3, y 2.8.2), vimos como a partir del descubrimiento de las propiedades fotoeléctricas del selenio, surgieron las primeras propuestas de utilización de este material para la producción de

imágenes y de su correspondiente transmisión a distancia. Recordemos la idea de G. R. Carey, formulada en 1875, dos años después de este descubrimiento, que proponía fabricar una pantalla integrada por miles de pequeñas células fotoeléctricas de selenio para la captación de imágenes. Cada célula quedaría conectada a un hilo, y cada hilo desembocaría en un punto concreto de una pantalla reproductora de la escena u objeto retratados. La impracticabilidad de esta propuesta fue a todas luces manifiesta, tal como se encontraba el estado de la tecnología de transmisión de aquellos años, pero la idea original, de un entramado de glóbulos o células fotosensibles, pervive aún en la actual tecnología de píxeles. En 1879, Constantin Senlecq (1842- 1934), sugirió la secuenciación de estas señales mediante un conmutador en forma de disco rotatorio que denominó *Telectroscope*, lo que permitiría el uso de un solo canal de conducción. Maurice Leblanc (1857- 1923) añadió a esta propuesta, la idea de utilizar dos espejos oscilatorios, uno de mayor rapidez para la exploración de los elementos horizontales, y otro más lento, para cada línea explorada, lo que representa un claro antecedente de las técnicas de escaneado por haces de electrones llevadas a la práctica posteriormente en multitud de instrumentos, incluida la propia televisión. El *disco explorador* de Paul Nipkow (1860- 1940), desarrollado en 1884, y conocido también como disco *perforado* o de *desintegración*, fue el siguiente paso en este sentido. Se trata de un disco de exploración, formado por pequeños orificios equidistantes, dispuestos en espiral, que deja pasar la luz de la escena a la velocidad constante de rotación del disco. Las entradas de luz son recogidas por un conjunto de células fotoeléctricas, que realizan la conversión de luz en electricidad. A partir de ahí, la señal es debidamente amplificada y llevada a un tubo de descarga, que produce luz en consonancia con los niveles de brillo de la escena original. Estas descargas son nuevamente escaneadas por otro disco explorador, a fin de reproducir la imagen captada. La falta de luminosidad consustancial a este tipo de técnica, se traducía en imágenes muy pobres, hecho que forzó la invención de otros sistemas de exploración, tales como el de E. Ekström<sup>33</sup>, puesto en funcionamiento en 1910. Este método, denominado *escaneado por punto de luz móvil* (Flying Spot Scanning), consistió en iluminar de forma intensa la escena que se quería captar por medio de un haz de luz concentrado en el mismo orificio de exploración; esto permitió una mayor luminosidad de cada uno de los puntos del objeto y, por consiguiente, imágenes de mayor calidad.

De cualquier forma, todos estos intentos por conseguir un sistema de televisión práctico y de calidad, tuvieron que esperar a que la tecnología de la radiocomunicación se pusiera en práctica una vez que las válvulas termoiónicas y los dispositivos de captación de luz fueron perfeccionados, hecho que no se consiguió hasta la llegada de los fototubos o células fotoeléctricas por emisión y de los fototubos multiplicadores. Una vez cumplidos estos requisitos, J. Logie Baird pudo materializar en 1926 la idea original de Nipkow, transmitiendo una imagen diminuta, explorada en 28 líneas, a razón de 12,5 barridos o cuadros por segundo. Dos años más tarde, en 1928, logró transmitir las primeras imágenes de televisión a través del Atlántico, siendo recibidas cerca de Nueva York en un formato de tres pulgadas cuadradas<sup>34</sup>.

La industria del momento intentó encontrar fórmulas prácticas y comerciales de este modelo de televisión electromecánica, algo que consiguió a pequeña escala con los sistemas de transmisión de películas, diapositivas o de bustos parlantes<sup>35</sup>; o en ensayos como el *telefonovisión*, un sistema híbrido, mitad cinematográfico, mitad televisivo, impulsado a principio de la década de los treinta por la firma Telefunken<sup>36</sup>. Con este aparato se consiguió proyectar escenas grabadas con cámaras de televisión en salas de proyección cinematográficas, o incluso llevar a la práctica las primeras experiencias de videoteléfono (Figura 4.38.). Los ensayos previos de Manfred von Ardenne con tubos de rayos catódicos, fueron decisivos en estos proyectos, así como en el futuro desarrollo del microscopio electrónico de



barrido. Sin embargo, la tecnología presentaba tantas limitaciones en cuanto a capacidad de transmisión, falta de sensibilidad, escasa calidad de imagen, o excesiva dependencia de la distancia entre el objeto y las células fotoeléctricas, que se pusieron en práctica distintas propuestas para paliar sus efectos, como la fabricación de discos exploratorios provistos de una pequeña lente en cada uno de los orificios a fin de aumentar la luminosidad de las escenas (Figura 4.39.); nuevas tecnologías basadas en el uso de tambores de espejos y de células Kerr; o sistemas mixtos, similares al *telefonovisión*. En este caso, la grabación de eventos se llevaba a cabo mediante cámaras cinematográficas, que precisaban del correspondiente revelado del material fotográfico, *in situ*, normalmente en un pequeño laboratorio automático, emplazado en la misma unidad móvil donde podía ser traducido rápidamente a señal televisiva y procederse a la transmisión (Figura 4.40.). Este procedimiento fue puesto en práctica en las transmisiones de los juegos olímpicos de Berlín de 1936, en la celebración del congreso del Partido Nacional -Socialista Alemán de 1937, y en la visita de Mussolini a Berlín ese mismo año.

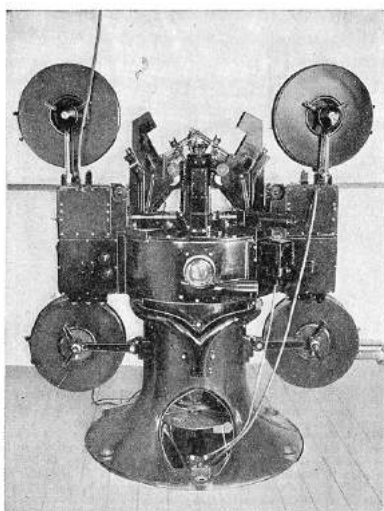


Fig. 4.39. Explorador de TV para películas, diapositivas o bustos parlantes. c.a. 1930.

más completa esta tecnología, arropado por un ingente número de colaboradores y por la floreciente industria norteamericana del momento. Aunque el primer dispositivo fabricado por Zworykin, denominado iconoscopio, salió de los laboratorios en 1923, la primera demostración pública de esta tecnología tuvo que esperar a 1929<sup>38</sup>. Los principios fundamentales de la televisión quedaron recogidos posteriormente en su obra clásica *Televisión*<sup>39</sup>. En esta década, se propusieron diversos sistemas electrónicos de exploración de imagen, como el tubo diseccionador de Philo. T. Farnsworth, considerado más apropiado para operaciones de reproducción de imágenes fotográficas y cinematográficas por los niveles altos de iluminación que precisaba; o el *súper-ojo* de Francis Henriontau<sup>40</sup>, pronto superados por el tubo



Fig. 4.38. Telefonovisión. Correo nacional Alemán. c.a. 1930.

Este tipo de limitaciones incitó a los científicos a poner su mirada en el tubo de rayos catódicos de Braun, como medio de exploración electrónica de las escenas que se querían televisar. Los primeros en hacerlo, como vimos, fueron Max Dieckmann y Gustav Glage en 1906 (Ver cap. 4.2.4), seguidos de Boris Rosing en 1907, quien señaló la potencialidad del tubo para funciones de escáner del tipo *punto móvil*, tal como se constató posteriormente con los primeros ensayos de telecinado. Al año siguiente, A.A. Campbell Swinton propuso un modelo de televisión totalmente eléctrica, comentado anteriormente, que denominó *visión eléctrica a distancia*, y que presentó como alternativa al modelo *telecinematográfico* que, a su entender, englobaba a todos los restantes<sup>37</sup>. Pero fue Vladimir Zworykin, tal como salió a relucir brevemente en el capítulo dedicado al osciloscopio, el que desarrolló de forma



Fig. 4.40. Sistema híbrido de cine y TV. Correo Nacional Alemán. 1936.

de Zworykin que supo aunar todas estas contribuciones en el nuevo concepto de *almacenamiento de cargas*, un principio realmente revolucionario en la época<sup>41</sup>.

El esquema de funcionamiento de la televisión electrónica, quedó reducido a una serie de mecanismos y procesos estandarizados que se mantienen en gran parte hasta nuestros días: 1) una lente convencional fotográfica, encargada de recoger la luz de la escena; 2) un mosaico de células fotoeléctricas, responsable de recoger esta luz, y traducir sus distintos niveles de brillo en unas determinadas cargas eléctricas; 3) un sistema de lentes electrónicas formado por campos magnéticos y electrostáticos, que tienen la capacidad de desviar el haz de electrones, procedimiento con el que se consigue controlar el foco y la intensidad de corriente del mismo. 4) Un *cañón de electrones*, responsable de la producción de esta haz de electrones, que se proyecta sobre el mosaico fotosensible a modo de barrido. En un principio, el cañón del iconoscopio proyectaba los electrones desde el cátodo situado fuera del eje de formación de la imagen lo que condicionaba una estructura del sistema un tanto tortuosa y voluminosa en forma de Y (ver Figura 4.14.). Esta deficiencia se subsanó en desarrollos posteriores al situarse en el mismo eje de proyección mediante el uso de mosaicos transparentes o de doble capa, tal como sucedió con las tecnologías Órticon y Vídicon. 5) La parte trasera de este mosaico está sensibilizada de manera que la llegada de los electrones va neutralizando cada célula de acuerdo con su carga, carga que a su vez viene determinada por la luz recibida en la parte frontal del mismo. 6) Las descargas son amplificadas, moduladas y asociadas a unos determinados pulsos de sincronización para conseguir que la transmisión y recepción de las señales se haga sin errores. 7) La transmisión se hace por cable o por radio. Y 8), la recepción y reproducción de las señales se lleva a cabo por el procedimiento inverso, con la utilización de la pantalla fluorescente de un tubo de rayos catódicos, que reproduce la imagen de acuerdo con las diferentes amplitudes de señal recibidas.

Una variante de este procedimiento fue el de “*punto móvil*” (Flying spot), fruto de las primeras experiencias de Rosing en microscopía de especímenes transparentes y en transmisión de diapositivas y películas, al modo de escáner. En este caso, la cámara, correspondiente al sistema de lentes convencionales, es sustituida por un tubo de rayos catódicos. El haz de electrones lee directamente de la pantalla de este tubo, produciendo un *punto de luz móvil* (Flying Spot), de brillo constante, que es proyectado sobre el objeto. El objeto deja pasar más o menos luz dependiendo de los niveles de densidad presentes en su superficie, lo que es detectado por una célula fotoeléctrica que transforma la luz en cargas eléctricas de forma inversamente proporcional para lograr una imagen positiva. A partir de aquí, el proceso sigue los pasos básicos de amplificación, modulación, etc. de las señales.



Fig. 4.41. Un tubo de imagen de un receptor de TV de 16 pulgadas. 1949.

El desarrollo del iconoscopio y del kinescopio de Zworykin abrieron paso a una serie de tecnologías que redundaron en nuevas cámaras y monitores de televisión, ligados a nuevas patentes y firmas comerciales. En general, la ciencia tuvo que ir adaptándose a estos modelos industriales, ligados fundamentalmente a la *comunicación de masas* (broadcasting), eligiendo uno u otro sistema en consonancia con sus necesidades particulares en los laboratorios. En líneas generales, los distintos tubos de imagen y de receptores de televisión, puestos en práctica a partir del iconoscopio y del kinescopio, han estado condicionados por el estado de desarrollo y por los avances experimentados en el seno de la

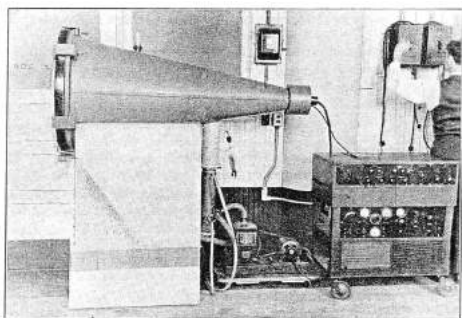


Fig. 4.42. Kinescopio desmontable de 31 pulgadas.

de la II guerra mundial, gracias a la aparición del tubo Orthicon. La principal aportación de este tubo vino dada por la incorporación de una placa transparente que hacía la función de fotosensor, y que podía ser leída por el haz de electrones desde su parte trasera. Al poco tiempo, el tubo Orthicon experimentó una nueva mejora, consistente en acelerar los electrones liberados del sensor por medio de un campo magnético, y hacerlos impactar en una segunda placa que lograba generar una nueva fuente de electrones secundarios, amplificando de forma considerable el efecto fotoeléctrico del conjunto del sistema. La sensibilidad de este nuevo tubo, denominado *tubo de imagen Orthicon*, fue notable por superar cualquier método anterior, incluido el fotográfico (Figura 4.43.). El sistema Orthicon se desarrolló en formatos de 3 y de 4½ pulgadas de diámetro, y se caracterizó a lo largo de los años por presentar una óptima resolución y una escasa borrosidad y retardo en la captación de objetos en movimiento. A partir de 1965, presentó nuevas mejoras, como la de poder grabar fotos fijas de forma continuada sin presentar fatiga o distorsiones, y captar objetos en movimientos en condiciones de baja luminosidad, mejoras que fueron aprovechadas por los estudios de televisión y por las investigaciones en el ámbito de la astronomía. (Figuras 4.44., 4.45., y 4.46.)

El siguiente paso de consolidación de la tecnología televisiva vino dado por la aparición de las cámaras Vídicon, término genérico que englobó una serie de tubos de imagen desarrollados a lo largo de varias décadas, y representativos de uno de los sistemas más utilizados por la industria de la televisión y por la ciencia. El tubo de imagen Vídicon supo integrar de forma más compacta y efectiva todos los dispositivos utilizados hasta entonces, combinando la fotoconducción como método de detección de las radiaciones, con la lectura desde la parte posterior del sensor. Su tecnología experimentó numerosas modificaciones, orientadas fundamentalmente a conseguir mayores niveles de resolución, mejores sistemas de lectura, y mayor adaptabilidad

electrónica; de aquí que se puedan establecer periodos concretos ligados a dispositivos tales como las válvulas termoiónicas de amplificación, las diferentes células fotoeléctricas, el transistor y los distintos materiales semiconductores ligados a la física del estado sólido, o los dispositivos de transferencia de carga o CCDs.

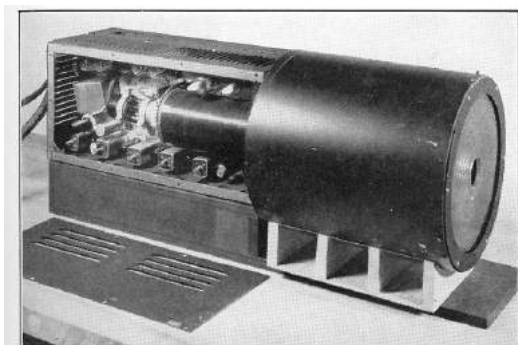
Tras una primera etapa de experimentación con diferentes modelos de iconoscopios y kinescopios (Figuras 4.41 y 4.42.), se abrió un nuevo período de consolidación de este tipo de tecnología, coincidente con los primeros años



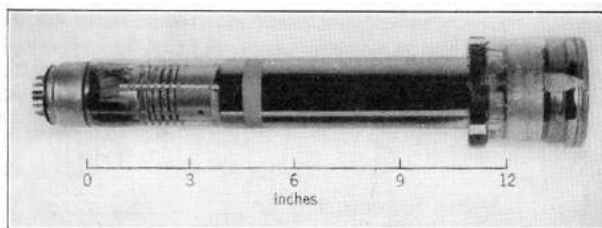
Fig. 4.43. Comparación de sensibilidades de un orthicon y de una película de 35 mm Super XX. Fotografías de la pantalla de TV y del sujeto en condiciones de luminosidad. cada vez más precarias 1949.



para su uso científico, al incluir fotorreceptores de longitudes de onda pertenecientes a franjas del espectro no- visible (Figura 4.47.). La divergencia entre los modos de operar de la televisión y de la fotografía o el cine fue un motivo de continuos problemas a lo largo de varias décadas, particularmente a la hora de transferir los resultados de un sistema a otro. La perfecta sincronización de los



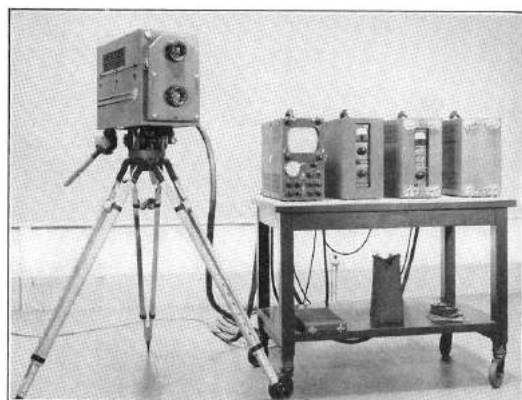
*Fig. 4.44. Cámara Orthicon con óptica de proyección reflexiva. 1949.*



*Fig. 4.45. Tubo Orthicon. 1949.*

obturadores mecánicos, tanto fotográficos como cinematográficos, con respecto a los cuadros generados electrónicamente, era un requisito imprescindible si se quería obtener un registro duradero de las imágenes de televisión, especialmente en multitud de estudios de tipo científico o para el almacenamiento de transmisiones televisivas convencionales de cierta relevancia<sup>42</sup> (Figura 4.48.). Gran parte de la solución de este tipo de problemas vino dado por la incorporación de los sistemas de grabación magnéticos, que comenzaron a ser comercializados a partir de 1934, entre otras, por la firma Marconi- Stille<sup>43</sup>; y especialmente con la llegada de la cinta magnética a principios de los cincuenta. Sería principalmente la tecnología Vídicon, asociada a esta nuevas formas de grabación magnética, la que abriría en la década de los sesenta el mercado de las cámaras de vídeo al sector doméstico<sup>44</sup>.

Las imágenes de televisión presentan unas características propias en cuanto a niveles de resolución, calidad de imagen, escala de grises, formación de color, fijación y profundidad del foco, que las hace distintas de las fotográficas, y más o menos idóneas para determinadas aplicaciones científicas. Las amplitudes máximas de las señales corresponden a los puntos de mayor brillo o luminancia (100%), mientras que los negros intensos se corresponden con amplitudes de señal del 30%. Los distintos tonos de grises intermedios ocupan, por tanto, esta



*Fig. 4.46. Cámara orthicon de estudio con equipo auxiliar. 1949.*

franja entre el 100% y el 30%, quedando destinado el margen inferior de amplitudes del 30% al 0%, a señales necesarias para la sincronización, cuya presencia o no en el conjunto de las mismas, da lugar a lo que se conoce como señal de vídeo compuesto, o no-compuesto, respectivamente. La señal de vídeo, generada por las distintas cámaras, es necesario traducirla a señales de radiofrecuencia para su transmisión, lo que se consigue con los moduladores y demoduladores de frecuencias. Esta variedad técnica es la que origina la diferencia entre los receptores de televisión convencionales,



que operan con señales de radiofrecuencia, y los distintos monitores que funcionan directamente con señal de vídeo, de mayor calidad de imagen, y que normalmente están ubicados en los estudios de televisión o en sistemas de control de procesos de uso industrial. La resolución de las imágenes viene dada por la mayor o menor presencia de líneas de escaneado, pudiéndose ser por tanto, vertical u horizontal. Normalmente, es el número de líneas horizontales, que conforman la altura de la imagen, la que determina el modelo de receptor de televisión: 525 líneas del sistema americano y 625 del europeo, o el 1080 de HD de nuestros días. En el europeo estándar, 600 líneas del total son utilizadas para la imagen, y el 25 restante

para márgenes negros y operaciones de deflexión del haz de electrones. Lo que significa que el sistema puede resolver un máximo de 300 líneas, relativas al blanco, por 300 líneas para el negro. En cambio, la resolución horizontal viene dada por los cambios de luminosidad o brillo que se producen a lo largo de estas líneas horizontales, en posiciones consecutivas. En este caso, intervienen otros factores como la calidad del sistema de lentes y del tubo de imagen, el nivel de aumento de la imagen respecto del objeto, o el ancho de banda de los amplificadores o capacidad del sistema para manejar los cambios bruscos entre niveles distintos de brillo, medidos en ciclos o hertzios por segundo<sup>45</sup>. Un concepto determinante en el conjunto de la imagen electrónica es el de la *relación señal/ruido* (SNR, o Signal to Noise Ratio), que en términos generales puede ser comparado con el de grano de las emulsiones fotográficas. Su expresión, al igual que el de la sensibilidad fotográfica, viene dada por una curva logarítmica que se aparta de un comportamiento lineal; y sus unidades se miden en decibelios. De aquí, que una relación SNR de 40 dB en una imagen de televisión, represente una señal silenciosa o de óptima calidad, mientras que una de 20 dB es considerada muy ruidosa o deficiente. La señal electrónica, en general, contiene una serie de interferencias y zumbidos propia de este tipo de sistemas, que vienen dados por influencias exteriores, como las mismas líneas de alimentación de corriente, campos magnéticos próximos, o térmicos, corrientes de oscuridad, etc., que es necesario amortiguar mediante filtros moduladores o por amplificación de las señales. Se debe buscar un punto de equilibrio entre los niveles de resolución, ancho de banda y ruido, dependiendo del tipo de aplicación que se pretenda llevar a la práctica. Mientras más ancho de banda, mejor resolución, pero más ruido. La respuesta espectral de las cámaras de televisión está ajustada normalmente para ser utilizadas con luz tungsteno, y para responder a una curva de sensibilidad próxima a la del ojo humano, aunque gozan de gran flexibilidad al poderse cambiar las características espectrales tanto del sensor como de la pantalla fluorescente para conseguirse respuestas relativas al espectro ultravioleta y de infrarrojos, e incluso de rayos X. Por último, la formación del foco y de la profundidad de foco en el sistema televisivo no se consigue por medio de la utilización de diafragmas reducidos o de



*Fig. 4.47. Sistema integral de escáner, vidicon color y pantalla CRT para el estudio de especímenes en longitudes de onda del UV. 1958.*



*Fig. 4.48. Cámara de 35 mm para la grabación de imágenes de TV. 1954.*



de electrones, que conservaron su cometido en labores de lectura y almacenamiento de cargas. Este tipo de tecnología pronto desarrolló tubos de imagen, como el Ultracon de la RCA, con fotodiodos que recibieron el nombre de *Vídicon de silicio* (silicon- target vidicon, Si- vidicon, o SiV)<sup>48</sup>, y posteriormente, cámaras con tecnología multicapas tipo Vídicon, con sensores denominados SIT (silicon- intensified target). Estos sistemas híbridos impulsaron la fabricación de sensores de alta sensibilidad, de escaso ruido, e ideales para situaciones de escasa luminosidad, por lo que fueron muy aplicados en telescopios.

*Esta combinación puede registrar imágenes de objetos tan pequeños como una pelota de baloncesto a una distancia de 22.000 millas, con la luz de las estrellas como única fuente de iluminación.*<sup>49</sup>

La aparición de la tecnología de transferencia de cargas<sup>50</sup>, o de CCD (Charge Coupled Devices) en 1970, logró sintetizar las operaciones relativas a la fotodetección, lectura y almacenamiento de la información lumínica en un sólo dispositivo, dispuesto de forma compacta y eficiente, y fabricado con material semiconductor. En este caso, la tecnología de escaneado por haz de electrones no es necesaria. Este dispositivo marca un punto de inflexión en la historia de la imagen tecnológica, porque se trata de un artificio que ha sido capaz de integrar de forma magistral todo el avance científico producido en torno a la imagen artificial durante más de un siglo y medio, y porque ha puesto fin a un extenso período caracterizado por el protagonismo de la fotografía de las sales de plata en los ámbitos científico, artístico y documental.

#### **4.11. La Optica electrónica**

Si contemplamos en la historia el desarrollo de las diferentes técnicas de visualización generadas por la tecnología de la televisión, y hacemos un ejercicio de síntesis, buscando lo común a todas ellas, comprobamos que es el concepto de *fotoelectrónica* el que mejor define este tipo de tecnología. Este término comenzó a ser utilizado con mayor asiduidad a partir de los años sesenta, una vez que la *física del estado sólido* se consolidó dentro del contexto de la ciencia, ofreciendo resultados prácticos para la industria. Si consideramos la transmisión a distancia de las imágenes efectuada por la tecnología televisiva como algo subsidiario, como algo perteneciente al campo de las telecomunicaciones más que al de la tecnología de la imagen, o si en favor del análisis que guía estas páginas, despojamos de la idiosincrasia de este instrumento el prefijo tele, nos encontramos con un instrumento muy próximo al fotográfico ( o por extensión al cinematográfico). Esto es, un sistema de captación de luces y sombras, capaz de procesar internamente la información al transformar un tipo de energía en otro, y capaz de reproducir, normalmente en dos dimensiones, los rasgos luminosos presentes en la escena observada. Por tanto, la frontera entre ambas tecnologías quedaría demarcada por los conceptos de fotoquímica y fotoelectrónica, respectivamente. En las dos encontramos fotones y electrones, que no dejan de ser conceptos nacidos de realidades más o menos tangibles, mensurables y observables, si no de forma directa, a través de sus efectos. El reconocimiento del electrón, como unidad básica de los fenómenos eléctricos, y como una de las partículas constitutivas de la materia a partir de los trabajos de J. J. Thomson, constituye el inicio de un nuevo camino para la ciencia que ha redundado en la creación de múltiples instrumentos de observación.

Posteriormente, surgió la propuesta de asemejar las múltiples manifestaciones del electrón con el comportamiento de la luz, tal como quedó recogido en las tesis de Louis de Broglie de 1922. Luz y electricidad se encuentran, en mayor o menor medida, en el origen de la mayoría de los sistemas de visualización, por la sencilla razón de que este binomio descansa sobre las unidades mínimas del fotón y el electrón, partículas constitutivas del universo que nos rodea. La aceleración de los electrones en el interior de los tubos de descarga demostró a principios de siglo que su comportamiento en el vacío se asemeja a la luz. Si la luz en sus múltiples manifestaciones, es estudiada por la óptica convencional, física y geométrica; la fotoelectrónica y el conjunto de procesos e instrumentos de observación nacidos de ella, se deben por entero a la óptica electrónica.

Básicamente, la óptica electrónica estudia el comportamiento de los electrones y su modo de propagación. Si las ondas del sonido son de una longitud enormemente mayor que las de la luz, las ondas formadas por los electrones son cien mil veces más pequeñas que las ondas de esta última. Es precisamente este hecho, el que hace que su comportamiento sea en algunos aspectos diferente, y extremadamente útil a la hora de generar determinados medios de observación. En líneas generales, la óptica electrónica rige el funcionamiento de tres familias de instrumentos de producción de imágenes. Primero, los derivados del tubo de imagen, que comprende los diversos tipos de osciloscopios y de cámaras y receptores de televisión estudiados en capítulos anteriores, y que se extienden hasta nuestros días con la presencia de los múltiples sistemas de imagen digital. En segundo lugar, la familia constituida por el microscopio electrónico en todas sus modalidades. Y por último, los distintos aceleradores de partículas, apartado en el que podemos incluir algunos tipos de espectroscopía, como la de masas o la de radiaciones  $\beta$ , que utilizan la aceleración y deflexión de electrones como medio de análisis de elementos y materiales.

Vuelvo a insistir en que los haces de electrones presentan muchas similitudes con los de la luz, porque se propagan en línea recta, son reflejados, dispersados, o refractados, y están sujetos a aberraciones ópticas similares, tales como la *esférica*, que produce niveles de aumento diferentes en el centro y en la periferia de la imagen, la *cromática*, que surge por la presencia de diferentes longitudes de onda del haz electrónico, o el *astigmatismo*, que reproduce los puntos del objeto en el plano de la imagen en forma de elipses, en vez de círculos. Una diferencia sustancial que lo distingue respecto de la luz es su capacidad para poder ser desviado ante la presencia de campos magnéticos o electrostáticos<sup>51</sup>. La velocidad de los electrones queda afectada por la acción de estos campos, y éste es un factor determinante en la formación de imágenes. Su efecto sobre el flujo de electrones se asemeja al que producen las lentes convencionales al refractar de distinta manera los haces de luz de distintas longitudes de onda (aberraciones cromáticas). La difracción de los electrones, por tanto, depende de su velocidad de propagación, siendo éste un elemento decisivo tanto en microscopía como en los aceleradores electrónicos con los que se consiguen velocidades relativistas, o próximas a la de la luz.

Los elementos básicos que componen un sistema óptico de carácter electrónico, no se apartan demasiado de los que hemos expuesto anteriormente en los capítulos dedicados al osciloscopio y a la televisión. Contamos con un generador de electrones, denominado comúnmente *cañón de electrones*, un conjunto de lentes electromagnéticas, y un dispositivo de visualización, normalmente formado por una pantalla fluorescente. La distancia focal en este tipo de sistemas, se consigue con la variación de la intensidad de la corriente generada por las bobinas o lentes de deflexión; mientras que en los sistemas ópticos convencionales, viene dada por el uso de lentes de distinta longitud focal o variando la posición de las lentes respecto al plano focal.



Los electrones no han sido las únicas partículas atómicas utilizadas para producir técnicas de visualización de fenómenos. Protones, neutrones o positrones, debidamente acelerados, constituyen los elementos claves de instrumentos de detección, medición y observación, con principios muy similares a la óptica electrónica. Las interacciones de cada una de estas partículas con las partículas presentes en los átomos de los objetos explorados, una vez que han sido aceleradas y proyectadas sobre ellos, producen una serie de radiaciones que pueden ser convertidas en imágenes. Los electrones son las partículas más ligeras del universo atómico, y por sí solas no producen efectos visibles; normalmente, necesitan incidir sobre superficies electroluminiscentes, tales como las pantallas fluorescentes de los tubos de rayos catódicos, o bien actuar sobre placas fotográficas, donde producen efectos muy similares a los de la luz; o generar rayos X a partir del fuerte impacto contra los electrones del propio objeto. El resto de partículas consigue efectos visuales por procedimientos muy parecidos. Así pues, la interacción de los haces formados por estas partículas con los núcleos atómicos de los objetos, produce una serie de efectos energéticos que pueden ser detectados por técnicas tan concretas como radiografías (de protones, neutrones, etc.), procedimientos fotográficos convencionales; técnicas especiales como las emulsiones nucleares utilizadas en el registro de emanaciones radiactivas y radiaciones cósmicas; técnicas fotográficas de alta velocidad; sistemas de escáner, como la cámara de positrones; aceleradores de gran potencia, normalmente asociados a centelleadores, cámaras de expansión (burbujas, de niebla, de destellos, etc.), y osciloscopios.

Si los principales instrumentos de observación que se rigen por los principios de la óptica convencional, pueden resumirse en varios grupos generales como son: el microscopio, el telescopio, el espectroscopio, la cámara fotográfica y, como variante de esta última, el proyector; en el caso de la óptica electrónica, sus mayores representantes son los tubos de imagen, preferentemente el osciloscopio y la televisión, y el microscopio electrónico. Los aceleradores de partículas, no son en sí mismos instrumentos diseñados para la visualización de los fenómenos, si bien suelen apoyarse en instrumentos de este tipo. En el caso de la espectroscopía, es conveniente precisar que los utensilios más utilizados para la formación de las distintas líneas espectrales, como son las rejillas de difracción y los prismas que posibilitan el análisis de radiaciones, gases, compuestos químicos, etc., son sustituidas, en su versión electrónica, por el propio cristal que difracta el haz de electrones y por los campos magnéticos y electrostáticos que desvían en mayor o menor proporción el haz de electrones. Estos procedimientos dan lugar a la técnica de difracción de electrones y la espectrografía de masas, respectivamente<sup>52</sup>. Por su parte, los telescopios electrónicos en sí no existen, dado que los electrones necesitan de un medio como el vacío para su propagación, algo que es inconcebible en distancias astronómicas<sup>53</sup>. Lo más frecuente en estos casos, es la combinación de instrumentos ópticos, tales como el telescopio o el microscopio, con dispositivos electrónicos del tipo células fotoeléctricas, tubos fotomultiplicadores; tubos de rayos catódicos, que permiten la captación y formación de imágenes pertenecientes a fenómenos que se producen más allá de la franja visible del espectro (ultravioleta, infrarrojo, radio, o vibraciones acústicas). En este caso se trata de sistemas mixtos que no se rigen por las leyes de la óptica electrónica.

Los principios de la óptica electrónica fueron apareciendo a partir de los primeros ensayos con los tubos de rayos catódicos, y fueron consolidándose una vez que se llevaron a la práctica los primeros sistemas de deflexión utilizados en los osciloscopios. La televisión impulsó el desarrollo de la óptica electrónica a niveles de mayor definición y exactitud, una vez que aparecieron los distintos cañones de electrones utilizados tanto para la lectura o escaneado de las señales

ópticas producidas en el sensor de la cámara, como para la producción de la imagen en la pantalla fluorescente del monitor de televisión. En este caso, el control sobre el haz de electrones, en cuanto a su diámetro e intensidad, fue favorecido por la incorporación de elementos técnicos como diafragmas, formados por rejillas de control del potencial, y lentes electromagnéticas emplazadas a lo largo de tubos cilíndricos de diferentes diámetros, en los que quedaron distribuidos los distintos ánodos. Por último, este desarrollo se vio completado con la aparición del microscopio electrónico en sus diversas modalidades, instrumento en el que la combinación de técnicas (vacío, producción de electrones, deflexión, pantallas fluorescentes, fotografía, rayos X, etc.) ha sido la norma común, y en el que los principios de la óptica electrónica han quedado magistralmente definidos.

#### 4.12. El microscopio electrónico

La aparición del microscopio electrónico en la escena científica constituyó un verdadero hito histórico, especialmente en el ámbito de las disciplinas ligadas estrechamente a la observación del mundo diminuto inanimado y de los seres vivos, y que hasta entonces habían dependido en gran medida de la microscopía óptica. A partir de la segunda década del siglo XX, los niveles de resolución de las imágenes obtenidas con las diferentes técnicas microscópicas no podían ser superados. Los grados de aumento facilitados por las lentes, o el contraste aportado por las distintas técnicas de iluminación, como las de reflexión, contraste de fase, de fondo negro, de luz polarizada, etc., llegaron a un punto muerto, lo que supuso un serio impedimento para el análisis de las estructuras microscópicas. De acuerdo con el concepto de resolución aportado por Ernst Abbe<sup>54</sup>, sabemos que el ojo humano, no sin esfuerzo, puede resolver en las imágenes detalles de hasta 0.1 mm, lo que significa que puede distinguir entre dos puntos o líneas muy próximas de esa imagen, siempre que la distancia que los separa sea superior a esa cantidad. Cuando los dos puntos o líneas comienzan a juntarse por encima de esa medida, la imagen que captamos es de un solo punto o línea, o de una mancha difusa. La microscopía óptica utiliza fundamentalmente la luz como medio para conseguir niveles óptimos de resolución, siendo ésta una técnica que viene utilizándose desde la aparición de los primeros microscopios de Galileo y Leeuwenhoek hasta nuestros días<sup>55</sup>. Con el microscopio de una sola lente, se pudo aumentar los objetos hasta 400 unidades. Posteriormente, los microscopios compuestos, formados con una lente adicional, abrieron un nuevo ciclo de desarrollo de la microscopía óptica, con múltiples técnicas de observación desarrolladas a lo largo de casi cuatro siglos. En la actualidad es posible amplificar con este utensilio hasta 1000 aumentos, y obtener resoluciones de 0.0002 mm. A finales del siglo XIX, Abbe señaló que los niveles de aumento conseguidos por la microscopía presentaban un límite que se debe más al medio en el que la imagen se forma, que a las imperfecciones de las lentes<sup>56</sup>. Una vez que llegamos a un cierto nivel de aumento, los puntos que forman el objeto en consideración, comienzan a aparecer en la imagen como discos de luz, llamados *discos de Airy*, y no como puntos definidos y concretos. Este fenómeno se debe al fenómeno de la difracción, que depende a su vez de la luz que se emplea para iluminar el objeto, y de la apertura del diafragma del sistema óptico utilizado. La microscopía, y la fotomicrografía en particular, han desarrollado numerosas técnicas para vencer esta limitación. Unas veces, han sabido aprovechar fuentes y técnicas de iluminación que favorecen la formación de una imagen más contrastada; otras, han interpuesto entre las lentes y el plano de formación de la imagen, medios como el aceite, con un índice de refracción menor, que favorece sustancialmente la nitidez de las imágenes; y otras, han empleado luces de longitud de onda menor que la luz visible, normalmente la ultravioleta, para aminorar este efecto de la difracción. La utilización de óptica de cristal de cuarzo permitió dar un paso más en este sentido, al producir luz ultravioleta de menor longitud de onda.

*El límite del poder de resolución de cualquier sistema óptico define su habilidad para retratar pequeños objetos; y esto depende de la longitud de onda de la iluminación que utilizamos. La teoría óptica ha demostrado que no existe un microscopio que pueda revelar la verdadera figura de un objeto que sea más pequeño que la mitad de esta longitud de onda.*<sup>57</sup>

En líneas generales, todas estas técnicas desarrolladas dentro del campo de la fotomicrografía presentan un límite de resolución de 1.000 Å. U. (Unidades Angström<sup>58</sup>), y un máximo de aumentos aprovechables de 2.000x. Por debajo de estas cifras, el único camino posible es la microscopía electrónica, puesto que no existen luces de longitudes de onda menores que la ultravioleta, que puedan ser utilizadas por la óptica convencional. Los rayos X son de una longitud de onda tan pequeña que no existen lentes que puedan difractarlos, por lo que están incapacitados, hasta el momento, para formar un sistema de producción de imágenes relativas al universo microscópico. Por otro lado, la difracción de rayos X, o la de electrones, proporcionan un tipo de imagen en las que las fases pertenecientes a las ondas de luz emitidas por el objeto no están incluidas, por lo que deben ser posteriormente tratadas matemáticamente a fin de poderse obtener resultados prácticos. Hacia 1930, la única posibilidad que quedaba abierta era el uso de los haces de electrones, que por entonces contaban con una gran aplicación en diversos sectores de la industria, especialmente donde la tecnología de los tubos de vacío tenía una fuerte presencia.

Las primeras ideas sobre la posible utilización de haces de electrones finos, como medio de formación de imágenes microscópicas, se deben a H. Busch, propuestas que presentó en 1922 con un carácter muy provisional<sup>59</sup>. Fue dos años más tarde, al anunciar Louis de Broglie la posibilidad de aplicar los principios de la *mecánica ondulatoria* a los instrumentos ópticos como vía para encontrar una forma práctica y más precisa de calcular el poder de resolución de éstos, que comenzó a despertarse un interés generalizado y más en firme por estas partículas como fuente de formación de imágenes. Los experimentos de Germer y Davisson sobre la difracción del electrón avivaron estas expectativas, al hacer patente las semejanzas entre el comportamiento de la luz y de los electrones. Para entonces, la tecnología de los tubos de imagen se encontraba en pleno auge, por lo que no fue difícil aprovechar todo el conocimiento acumulado en su desarrollo para la invención de un nuevo microscopio, que tan solo tenía que sustituir el haz de luz por la emisión de un rayo de electrones en el vacío. Las técnicas de producción de vacío, las de generación de haces de electrones de diámetro reducido e intensidad controlada, las lentes electrónicas, tanto magnéticas como electrostáticas, o los dispositivos de visualización, tales como los monitores de pantallas fluorescentes de la televisión o del osciloscopio, se encontraban en pleno funcionamiento desde hacía años. Todo estaba listo para que en 1931, Ernst Ruska presentara el primer prototipo de microscopio electrónico, construido con dos lentes magnéticas. En solo tres años, y tras incorporarse una nueva lente, este *microscopio electrónico de transmisión*, consiguió superar los niveles de resolución obtenidos por la microscopía óptica (Figuras 4.50. y 4.51). En la actualidad, con el uso de microscopios de cinco lentes magnéticas, se consiguen resoluciones de 0.1 nm, con aumentos de hasta un millón de diámetros.



**Fig. 4.50. Microscopio electrónico para ampliaciones de hasta 150.000 diámetros. 1949.**

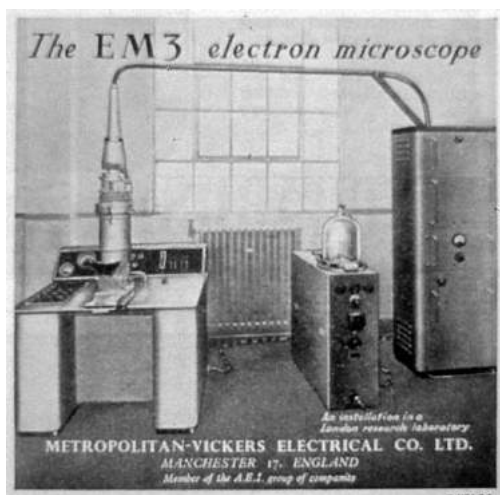


Fig. 4.51. Microscopio electrónico EM3. 1951.

El equipamiento básico que forma un microscopio electrónico consiste en una fuente de generación de electrones, que normalmente es un filamento de tungsteno o de wolframio, llevado a la incandescencia en el vacío, un sistema de lentes que se encarga de regular la intensidad, el diámetro y la dirección del haz de electrones, y una pantalla fluorescente que emite luz al ser golpeada por los electrones. La diferencia básica que existe entre las dos grandes familias de microscopios electrónicos: los de *transmisión* y los de *barrido*, descansa mayormente en este último dispositivo, relativo a la forma de producción de las imágenes y en cómo pueden ser observadas y registradas. En el microscopio de transmisión, se utilizan especímenes u objetos que permiten el paso del haz de

electrones, por lo que la imagen se produce de forma similar a como lo hace un proyector de transparencias convencional. El haz de electrones queda más o menos absorbido por el espécimen, dependiendo de sus niveles de densidad (espesor y composición), y forma este patrón sobre la pantalla fluorescente de acuerdo con la cantidad de electrones transmitidos. Hay que precisar que la incidencia del haz sobre el objeto puede producir diversos fenómenos de especial relevancia en la formación de la imagen. La absorción de los electrones es la responsable de lo que se conoce como *contraste de amplitud* de la imagen, mientras que los electrones dispersados en ángulos muy pequeños, forman el *contraste de fase*. Por el contrario, la dispersión en ángulos muy definidos, originados por la estructura cristalina del objeto, ofrece el *contraste de difracción*. Los dos primeros fenómenos son determinantes en la formación de la imagen de especímenes biológicos, no cristalinos; mientras que el contraste de fase y de difracción son decisivos en los especímenes cristalinos.

Aparte de estos fenómenos, los electrones pueden producir *electrones retrodispersados*, al ser reflejados por la superficie del objeto; *electrones secundarios*, que se deben a la emisión de electrones por el propio objeto, activada por el haz original; o rayos X, provocados por el fuerte impacto de unos contra otros, lo que nos proporciona una información de especial relevancia relativa a la composición elemental del espécimen. Este tipo de respuesta sirve de base para una técnica particular de la microscopía electrónica, conocida como *microanálisis por rayos X*. Otras posibilidades son que el objeto emita luz, fenómeno que es conocido como *catodoluminiscencia*; o que pierda cierta energía, respuesta que puede ser detectada por un espectrómetro de pérdida energética. Otras interacciones posibles han sido detectadas a lo largo de los años, contribuyendo al perfeccionamiento y conocimiento de este instrumento, como la emisión de calor, de pares electrón- hueco (conductividad inducida), radiación continua, electrones Auger, contaminación de la muestra por el depósito de partículas procedentes del sistema de vacío, etc.<sup>60</sup>.

Por su parte, en el *microscopio electrónico de barrido*, los electrones no atraviesan el objeto, sino que barren o leen su superficie, tal como sucede en la técnica de formación de imágenes de la televisión, donde el haz reflejado por el objeto es recogido sobre una pantalla fluorescente que se ilumina en consonancia con su intensidad. La idea original del microscopio de barrido se debe a Max Knoll, que ofreció algunas indicaciones de carácter general en 1935. Manfred von Ardenne proporcionó resultados más prácticos, al fabricar en 1938 un primer



prototipo de microscopio que realizaba el barrido sobre el objeto en sincronía con el movimiento giratorio de un tambor de metal, portador de una película fotográfica. Este primer microscopio operaba de forma mixta, por transmisión y barrido a la vez. La llegada de la guerra paralizó el desarrollo del nuevo instrumento, e incluso el prototipo original fue destruido por un bombardeo<sup>61</sup>. Pero la idea general de aprovechar los electrones reflejados como forma de producción de imágenes se encontraba ya en el ambiente de estos años por lo que la decisión de buscar una forma de controlar esta reflexión mediante un sistema de barrido del haz, prosiguió<sup>62</sup>.

*En 1948, las investigaciones sobre las posibilidades de un microscopio electrónico de reflexión habían empezado de forma independiente en varios centros: en la Unión Soviética, y en los laboratorios Cavendish, y de Ingeniería, ambos en Cambridge (por un método de barrido).*<sup>63</sup>

La definición, concepción y construcción definitivas de este instrumento se deben a Vladimir Zworykin y sus colaboradores, que como vimos, son los responsables asimismo del desarrollo de la televisión electrónica. En 1942, lograron construir un microscopio de barrido con un poder de resolución de 50 nm y un aumento de 8.000x. Sin embargo, este tipo de microscopio electrónico de barrido tuvo que esperar hasta 1965 para encontrar formas que pudieran ser llevadas al mercado; entre otras razones, debido a problemas de generación de ruido ocasionados por el uso de las válvulas termoiónicas y a que las necesidades de la industria y de los laboratorios se vieron ampliamente satisfechas por el de transmisión. Fue el desarrollo de la tecnología de transistores lo que permitió la fabricación de microsondas electrónicas como solución a este tipo de problemas, permitiendo la fabricación masiva de esta variedad de microscopio.

En este modelo, el haz de electrones es de un diámetro menor a 4 nm, y es producido por un filamento de wolframio. Su proyección sobre la muestra se lleva a cabo como si de un haz de luz se tratara, con la diferencia de que el rayo es controlado por lentes de tipo magnético. Este mismo sistema de lentes controla una serie de parámetros decisivos, como el foco, la resolución, que depende directamente del diámetro del rayo, el brillo, el número de líneas de barrido, o el tamaño del área explorada, como responsable directo del nivel de aumento de la imagen. El haz recorre punto a punto el espécimen, originando una serie de electrones secundarios y retrodispersados, encargados de la formación de la imagen. Es característico de este modelo, la producción de una imagen con una fuerte impresión de *relieve*, que depende en gran parte del ángulo de incidencia del rayo (Figura 4.52). La amplitud de la señal de estos electrones va cambiando de acuerdo con la topografía o con la composición atómica de la muestra, que en este caso es opaca al haz. Las señales son debidamente amplificadas y llevadas a un tubo de rayos catódicos, donde se produce un nuevo haz electrónico responsable de la formación de la imagen en la pantalla fluorescente. Ambos haces se encuentran perfectamente sincronizados con el fin de producir una imagen cuya apariencia viene dada por el área del espécimen explorada, hecho que determina el nivel de aumentos, y por los distintos niveles de luminancia.



**Fig. 4.52. Fotomicrografía electrónica de barrido. Glóbulos rojos en la sangre. (Coloreada) c.a. 1990.**

Tanto la microscopía electrónica de transmisión como la de barrido, culminan sus procedimientos con el registro fotográfico de las imágenes. Hasta la llegada de la tecnología digital, el cuarto oscuro fotográfico ha sido una pieza fundamental en toda unidad de microscopía electrónica. Desde los primeros experimentos de von Ardenne, o de E. Brüche, que logró realizar fotografías del paso de un haz de electrones a través de una serie de lentes magnéticas en 1931, un año después de la propuesta de Ruska<sup>64</sup>, la fotografía ha sido una pieza clave en el desarrollo de esta instrumentación, continuando de alguna manera la línea de apoyo y perfeccionamiento que desempeñó en la microscopía óptica. De hecho, la presencia de la fotografía en la microscopía electrónica desempeñó un papel más decisivo que en su homóloga anterior, donde la visualización de los fenómenos en el ocular era, en muchas ocasiones, más que suficiente<sup>65</sup>. Tanto la preparación de especímenes mediante la técnica de réplicas, como las características que deben seguir las pantallas fluorescentes en las que se forman las imágenes, han sido determinantes a la hora de conseguirse una técnica fotográfica especializada en estas tareas. La visualización de las imágenes resultantes en la pantalla fluorescente se suele hacer mediante una cámara de proyección que ayuda a definir el área que se quiere explorar, y a ajustar el foco, muchas veces mediante un visor adicional de aumento. En el de transmisión, una vez que se ha conseguido esta operación, el registro de la imagen se puede hacer colocando una placa fotográfica en el sitio de la pantalla, o por medio de una cámara de televisión, que puede ser conectada a su vez a una grabadora de vídeo. En el caso de la tecnología de barrido, se suele fotografiar directamente la pantalla por lo que se recomienda el uso de monitores de alta definición, o en su defecto, realizar copias en soporte vídeo, analógico o digital. La llegada de la tecnología digital ha cambiado el curso de estas operaciones en favor de técnicas de tratamiento de imágenes por ordenador, y de copias por impresoras.

A lo largo de los años, se aplicaron numerosas técnicas fotográficas a los resultados proporcionados por este tipo de microscopios. Destacan las estereofotografías obtenidas con el control del eje de inclinación de los especímenes mediante goniómetros, lo que proporciona un gran relieve a las imágenes; o las fotografías con adaptación de la *técnica de estrías* (Schlieren) para conseguir la micro- exploración de los campos eléctricos y magnéticos en términos de una imagen de fondo oscuro<sup>66</sup>; o las fotografías pertenecientes a diferentes secciones de un mismo objeto, tomadas en serie por el microscopio electrónico dado su profundidad de foco tan limitada. Esta técnica fue complementada en ocasiones con observaciones mediante microscopía ultravioleta, algo que proporciona un efecto de tridimensionalidad<sup>67</sup>. Desde la década de los sesenta, estas técnicas tridimensionales se vieron enormemente favorecidas por la aparición de la informática, que hizo posible el recuento y los análisis automáticos de las diferentes lecturas microdensitométricas de los diferentes planos

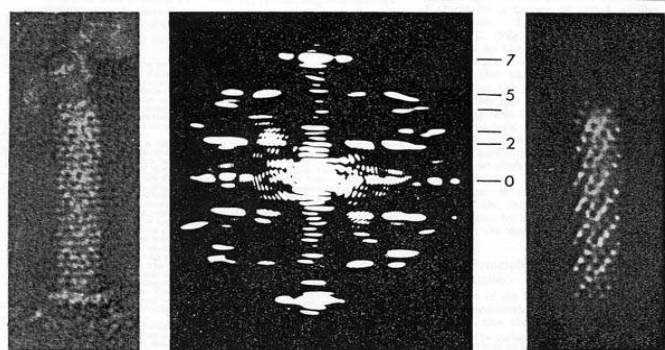
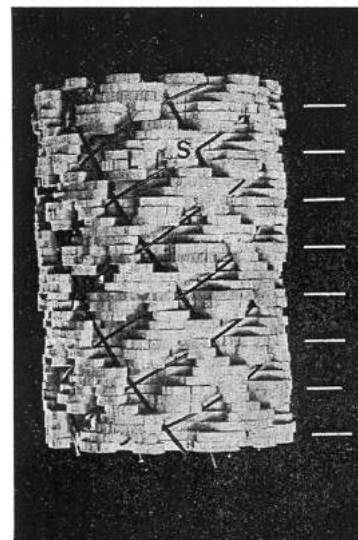


Fig. 4.53. Patrón de difracción óptico y fotomicrografías electrónicas de la cola de la bacteriofagia T4. 1968.

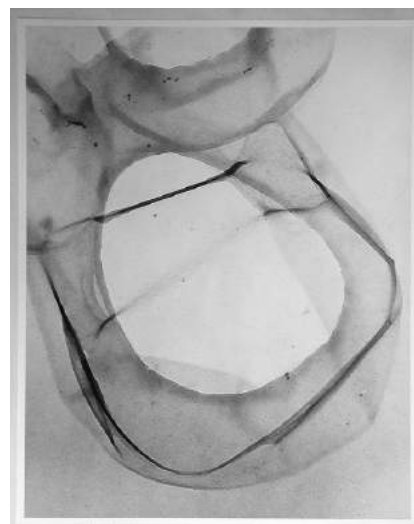
fotografiados y de su posterior ordenamiento en series de Fourier<sup>68</sup>. Estas técnicas se asemejan a las de difracción de rayos X utilizadas por los cristalógrafos ya que posibilitan la construcción de modelos tridimensionales, representativos de los objetos microscópicos observados (Figuras 4.53 y 4.54). A su vez, la investigación fue constante en el seno de la industria fotográfica para encontrar emulsiones y equipos más

apropiados para su uso con el microscopio electrónico. La rapidez y sensibilidad de los materiales, el grano, los niveles de contraste, o la escasa dispersión de carga debido a la incidencia de los electrones, fueron tradicionalmente las características más estudiadas<sup>69</sup>. En el de transmisión, se utilizaban placas o rollos de 35 mm, de emulsiones rápidas, adaptadas a la velocidad de los electrones. Y en el de barrido, la norma común fue la utilización de material especializado en el registro de los trazos originados en tubos de rayos catódicos, donde factores como la intensidad de la fuente de luz, la emisión espectral, los niveles de exposición posibles, o el movimiento del trazo cobraban especial importancia<sup>70</sup>. Hasta la llegada de la imagen digital, la fotografía de sales de plata fue la herramienta más utilizada dentro del ámbito de la microscopía electrónica debido fundamentalmente a la constitución granular de su imagen y a la amplísima gama de tonos de grises. Mientras que la fotografía alcanzaba en torno a veinte tonalidades distintas, la televisión convencional de la época operaba con sólo cinco.<sup>71</sup>



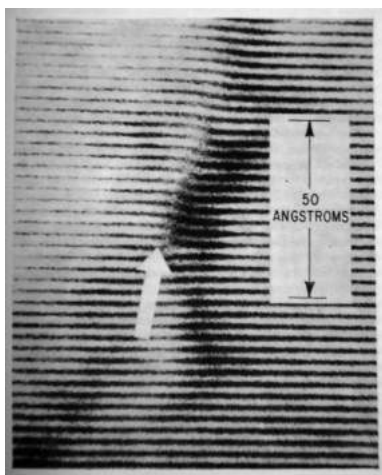
*Fig. 4.54. Modelo de la cola de bacteriofagia, basado en mapas de densidad de Fourier. 1968.*

A su vez, la microscopía electrónica ha sido una de las herramientas más importantes para el estudio de las propias emulsiones fotográficas. Durante la segunda guerra mundial, comenzaron los estudios al respecto, lográndose datos decisivos en análisis de sensitometría, formación de la imagen latente, o en el examen de los granos de las emulsiones<sup>72</sup> (Figura 4.55). Por otro lado, el conjunto de técnicas de microscopía electrónica ha experimentando avances espectaculares con la incorporación de nuevas técnicas de medición y observación a sus procedimientos básicos. El *microanálisis por rayos X*, con la utilización del *Detector de rayos X por dispersión de Energía* (EDX), que nos da a conocer los distintos elementos presentes en la muestra y sus concentraciones; la *espectrometría, tanto de longitud de onda* (EDLO) como la más reciente de *dispersión de energías* (EDE), la combinación de las técnicas de barrido y transmisión en un único instrumento (MEBT), el *análisis electroacústico de barrido* (MEAB), la *difracción de electrones*, la *tecnología de haz iónico* (FIB), que utiliza átomos cargados positivamente como partículas de exploración de las muestras, en vez de electrones; el uso de aceleradores, la microscopía de alta resolución, el uso de cañones de *electrones por emisión de campo* (FEG) aplicados tanto a la de transmisión como a la de barrido, etc., han convertido este tipo de microscopía en una de las técnicas más sobresalientes en el desarrollo científico del siglo XX. Hacia finales de la década de los sesenta, la aproximación a niveles de observación a una escala atómica comenzó a ser una realidad palpable dentro del campo de la microscopía. La técnica de *doble haz*, desarrollada en 1963 por W. C. T. Dowell, donde se combina la interacción del haz incidente sin refractar con uno de los refractados, posibilitó seis años más tarde fotografiar los planos atómicos dislocados en un



*Fig. 4.55. Réplica de granos de la película radioval expuestos en la franja de solarización, 1/4 seg. Ampliación placa: 40.000x Ampliación fotografía: 155.000x*





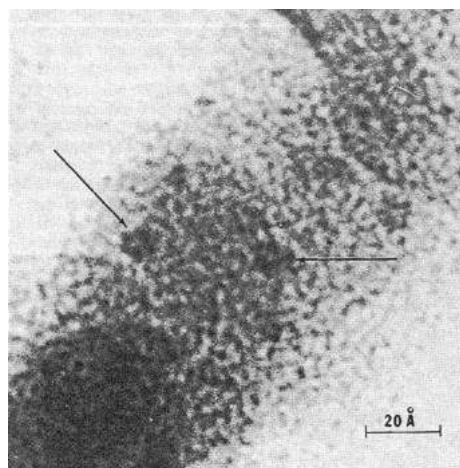
**Fig. 4.56. Fotomicrografía electrónica del defecto de la estructura en un cristal de germanio, hecha con la técnica de los "dos rayos", donde puede apreciarse los bordes de los planos de los átomos.1969.**

cristal de germanio<sup>73</sup> (Figura 4.56.); o la utilización de técnicas de alta resolución, con detectores de electrones capaces de discriminar entre los electrones dispersados elástica e inelásticamente, consiguió acercarse a las agrupaciones de átomos de rodio, presentes en el silicio<sup>74</sup> (Figura 4.57.). La llegada de los ordenadores, no ha hecho más que reforzar todas estas cualidades con la incorporación de herramientas lógicas de análisis y tratamiento automático de los datos y de las imágenes, y de dispositivos de control del funcionamiento de los distintos elementos de la instrumentación.

La tecnología de microscopía electrónica no se reduce a la simple formación de una serie de imágenes convencionales de dos dimensiones, hecho que por sí solo justifica suficientemente su existencia. Ya hemos visto, que la tecnología de barrido ofrece una sensación de relieve muy particular de esta técnica, que la aproxima a una visión tridimensional, capacidad que ofrecen los actuales microscopios estereográficos de alta resolución (Figura 4.58.). A ello hay que añadir las

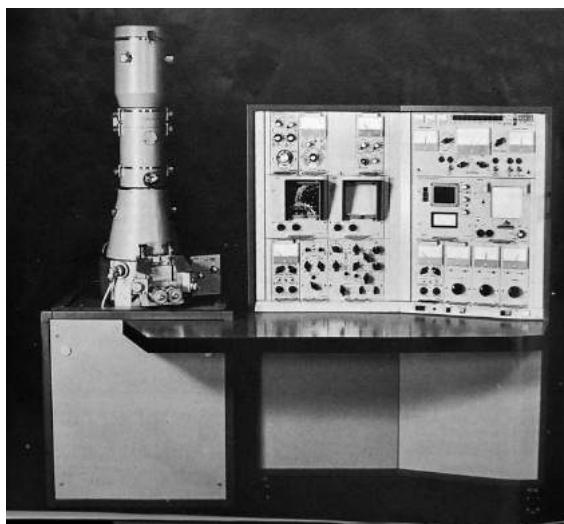
posibilidades que tiene esta técnica para llevar a cabo imágenes de tipo estroboscópicas, mediante la *inyección* controlada de la carga en un determinado punto del objeto en el tiempo; o para realizar escaneados por líneas, lo que permite obtener un perfil del brillo a lo largo de una línea de exploración de la imagen; o por último, para convertir incluso el haz de exploración, normalmente de iones (FIB), en una herramienta para operaciones micromecánicas de gran utilidad en labores de limpieza microscópica de materiales semiconductores, inserción de pistas conductoras o capas aislantes en circuitos integrados, lectura de soportes informáticos, cortes e incisiones precisos en materiales biológicos, como células o virus; fresados y afilados de lentes, puntas de microscopios de túnel, aleaciones complejas y materiales en capas<sup>75</sup>.

Uno de los caminos frecuentemente vaticinados en el desarrollo de los microscopios electrónicos desde su creación, fue el de la creación de fuentes de emisión de electrones de alto voltaje, lo que dio lugar en la década de los setenta a una línea nueva de investigación y de fabricación. Se trata de conseguir voltajes muy elevados, cercanos al millón de voltios, para producir rayos de electrones de gran penetración que permitan el estudio y la observación de materiales hasta entonces muy difíciles de analizar por estos medios por la imposibilidad de obtener muestras de grosor apropiado<sup>76</sup> (Figura 4.59.). Esta producción de fuentes de emisión de partículas de gran intensidad nos acerca a una tecnología muy próxima a la microscopía electrónica, y que está íntimamente ligada también a la generación de imágenes: los aceleradores de partículas.

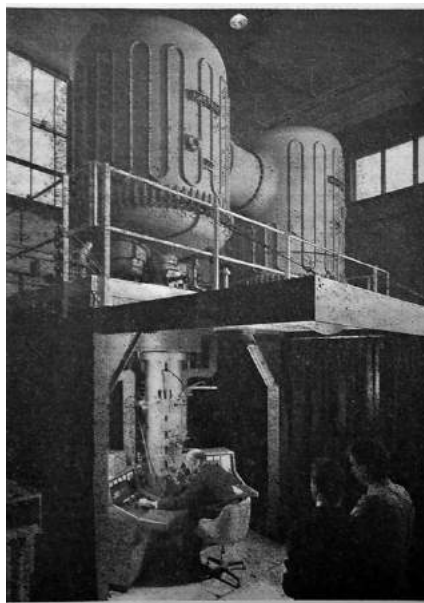


**Fig. 4.57. Las flechas señalan agrupaciones de átomos de rodio en silicio. 1971.**





**Fig. 4.58. Microscopio electrónico Stereoscam S4. 1971.**



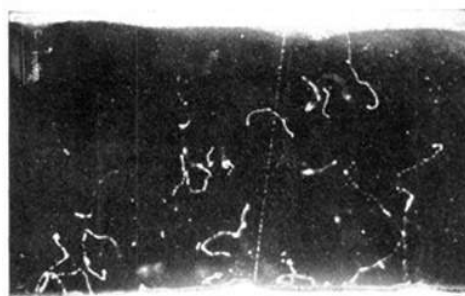
**Fig. 4.59. Microscopio electrónico de un millón de voltios, Harwell. Para el análisis de daños del material de reactores por radiación de neutrones. 1970.**

### 4.13. Los aceleradores de partículas y el universo atómico

Los aceleradores de partículas están íntimamente ligados a la física nuclear. Son instrumentos destinados mayormente a la exploración del universo atómico, y de las partículas que forman esos *ladrillos con los que se construye nuestro mundo*<sup>77</sup>. El motivo de que incluya estos dispositivos dentro del apartado de la óptica electrónica se debe al hecho de que comparten sus leyes y fundamentos básicos. Ya hemos visto cómo la aceleración de los electrones es un fenómeno que es observado por primera vez en el interior de los tubos de vacío, una vez que sus haces se propagan desde el cátodo al ánodo, atravesando un espacio vacío dominado por la acción de determinados campos electromagnéticos. Por tanto, la aceleración de electrones viene realizándose desde los primeros ensayos de Julius Plücker en 1858, y luego continuados por otros tantos autores, como Faraday, Hittorf, Goldstein, o Crookes. (Ver cap. 2.5.). Este camino de exploración conduce directamente al tubo de rayos catódicos de Braun, origen del osciloscopio y de la propia televisión. De hecho, esta última puede ser considerada como un acelerador de partículas más, junto al microscopio electrónico. La producción de haces de electrones cada vez más potentes, y debidamente controlados en cuanto a su dirección, diámetro, o intensidad, marcó a partir de la tercera década del siglo XX un camino de exploración del mundo atómico de gran trascendencia. La técnica básica de estos dispositivos consiste en producir haces de partículas de alta energía, convenientemente proyectadas contra determinados materiales, a fin de estudiar sus reacciones a niveles atómicos, especialmente la generación y el comportamiento de nuevas partículas. Dentro de esta vía de aproximación al universo atómico, fue decisivo el trabajo de J. J. Thomson, conducente al aislamiento del electrón, primera partícula subatómica en la que quedaron definidas carga y masa. Hemos comprobado a lo largo de estas páginas que, para producirse este hallazgo, fueron decisivos los primeros ensayos de C.T.R. Wilson sobre la formación de gotas de agua en un ambiente de aire húmedo, hecho decisivo en la invención de la cámara de niebla<sup>78</sup>. A partir de 1906, Robert A. Millikan comenzó a medir la carga del electrón de una forma más precisa. En vez de utilizar rayos X para la producción de iones en el aire, y medir la conductividad y temperatura durante la expansión que generan las gotas de agua, tal como había

hecho Thomson, utilizó aceite mineral dispersado con un atomizador, técnica desarrollada por un alumno suyo, Harvey Fletcher<sup>79</sup>. Este procedimiento le permitió observar de forma individual las gotas evaporadas, y no en agrupaciones con forma de nubes como había sido lo habitual hasta entonces. Las velocidades de ascenso y descenso de cada una de las gotas observadas, teniendo en cuenta la gravedad y la viscosidad del aceite, y la presencia de determinados campos electromagnéticos, le ayudaron a fijar con exactitud la carga eléctrica del electrón y su masa, definida esta última como la 1/2.000 parte del átomo de hidrógeno.

A partir de 1910, fecha en la que el electrón quedó perfectamente aislado como partícula, el estudio de nuevos elementos atómicos abrió un campo de exploración en la física con una gran repercusión en el resto de las ramas de la ciencia. El descubrimiento de estos elementos físicos ha continuado hasta nuestros días, sin señales de remisión. (Figura 4.60.).



*Fig. 4.60. Fotografía instantánea del movimiento de electrones. CTR. Wilson. c.a.1928.*

A la par de estos acontecimientos, el descubrimiento de la radioactividad en 1896 constituyó una nueva ruta de aproximación al universo atómico. Las emanaciones de los elementos radiactivos fueron clasificadas de acuerdo con su grado de penetración en la materia y sus características de propagación. Por entonces, se contaba con la experiencia de los rayos X, descubiertos un año antes, en los que se identificaron longitudes de onda extremadamente cortas. Recordemos que en las tareas de exploración y clasificación de estos nuevos elementos radiactivos, destacó la labor de Marie Curie y Ernest Rutherford (ver cap. 3.3. y 3.4.). En las mismas fechas que Millikan obtuvo sus resultados concernientes a la carga y masa del electrón, Rutherford anunció el descubrimiento del núcleo atómico. Este hallazgo fue el responsable directo de la formulación de un modelo de universo atómico, a semejanza de un sistema solar en el que existe un núcleo central de carga positiva, rodeado de una serie de capas de electrones que proporcionan el equilibrio del sistema a través de la suma de sus cargas negativas. También se comprobó con este hecho que el tamaño del núcleo es muy reducido, comparado con el tamaño total del átomo, que se debe fundamentalmente a las órbitas electrónicas. Para entonces, Rutherford había detectado también dos tipos de radiación en los materiales radiactivos, la  $\alpha$  y la  $\beta$ , cuyos comportamientos eran similares al de los rayos X. Y comenzó sus pesquisas por este camino, proyectándolas sobre delgadas láminas de distintos metales. Esto le sirvió para observar sus trayectorias y determinar la distribución de las cargas en los materiales. A partir de 1903, utilizó distintas técnicas para la observación de estos fenómenos, preferentemente el electrómetro de paños de oro, el centelleador de Crookes, y el contador Geiger, dispositivos que vieron completadas sus funciones con la capacidad amplificadora de la nueva generación de instrumentos electrónicos: la válvula diodo de Fleming, la válvula triodo de De Forest, o la de Langmuir, fundamentalmente. Ya vimos cómo la llegada de la fotografía, asociada a la cámara de niebla cubrió con creces sus aspiraciones experimentales, tal como se desprende de sus comentarios al respecto. En capítulos anteriores, hemos asistido al proceso interminable de observación y desciframiento de nuevas radiaciones y elementos como resultado de esta indagación en la naturaleza íntima y diminuta de la materia. De hecho, fueron las expediciones a grandes altitudes del planeta, completadas con el lanzamiento de globos equipados de dispositivos de medida y registro fotográfico para la captación de los rayos cósmicos, las que incitaron a la comunidad científica a buscar nuevas fuentes de radiación más cercanas, que pudieran ser generadas por medios artificiales en el seno de los

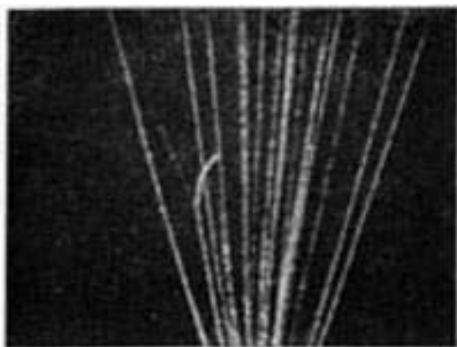
laboratorios. Este fue el camino que condujo a la fabricación de las primeras fuentes de aceleración de partículas, derivadas del estudio de los electrones.

El camino iniciado por Rutherford para la construcción de un modelo atómico, fue continuado por una serie de científicos de corte más teórico, que se encargaron de aplicar los nuevos principios de la mecánica cuántica a esta imagen de un universo microscópico al que se iban sumando cada vez más partículas. El modelo de Niels Bohr logró despejar una serie de dudas y limitaciones que contenía el de Rutherford, y abrió un nuevo sendero de actuación en el conjunto de la física, ciencia que se vio forzada, desde entonces, a reconocer cierto grado de complementariedad entre las diversas interpretaciones del mundo atómico, y a dar cabida a lo contingente a la hora de explicar el comportamiento de las partículas. El descubrimiento de las radiaciones  $\gamma$ , producidas también por los materiales radiactivos, y el estudio de las radiaciones cósmicas, abrió nuevas fronteras a la observación de este mundo invisible y diminuto del átomo. Se encontraron en estas radiaciones, longitudes de onda extremadamente cortas, y grados de penetrabilidad hasta entonces desconocidos. La ayuda que la fotografía prestó en estos estudios fue decisiva. Paul Villard logró fotografiar en 1900 los efectos producidos por los rayos  $\gamma$ , hallazgo que fue interpretado de forma más precisa por el propio Rutherford y Andrade, en 1914; y el papel desempeñado por las fotografías relativas a los rayos cósmicos, ha sido convenientemente destacado en capítulos anteriores (ver cap. 3.7.). De hecho, fueron las expediciones a grandes altitudes del planeta, completadas con el lanzamiento de globos, equipados de dispositivos de medida y registro fotográfico para la captación de este tipo de rayos, las que hicieron ver a la comunidad científica la necesidad de buscar nuevas fuentes de radiación más cercanas, que pudieran ser generadas por medio artificiales en el seno de los laboratorios. Este fue el camino que condujo a la fabricación de los primeros mecanismos de aceleración de partículas, que en un primer momento se aplicaron a los electrones.

El frente de exploración de las partículas atómicas conjugó varias vías de aproximación, que tuvieron en común un procedimiento básico: producir una fuente de radiación de alta energía, lanzarla contra determinados objetivos, y contar con una serie de instrumentos que pudieran detectar y hacer visibles los fenómenos que allí ocurrían. Los rayos cósmicos, la radioactividad y los aceleradores de partículas conformaron las principales fuentes de producción de radiaciones utilizadas por la recién instaurada física nuclear; de carácter natural, en el caso de los dos primeros, y artificial, en los últimos. Los contadores de partículas, electrómetros, las emulsiones nucleares fotográficas, las diferentes cámaras de expansión (de niebla, burbujas, de destellos), los centelleadores, los espectrómetros, o las pantallas fluorescentes, fueron los instrumentos de observación y medición más utilizados para estos propósitos. Es importante señalar, que la fotografía de las sales de plata estuvo presente en la mayoría de estas técnicas, como máximo exponente de la fase final y decisiva del montaje experimental, relativa al registro documental de los fenómenos.

Las nuevas partículas fueron apareciendo a lo largo de un proceso histórico que conviene recordar. Una vez descubierto el núcleo por Rutherford, se llegó a la conclusión de que éste debía estar compuesto por diferentes elementos, pues era necesario contrarrestar la carga negativa de los electrones dispuestos en órbitas alrededor del mismo. En un principio, se pensó que estos elementos eran núcleos de hidrógeno, algo que concordaba con la antigua teoría de Prout, de 1815, que afirma que los distintos elementos presentes en la naturaleza son, en realidad, agrupaciones de átomos de hidrógeno. En aquellos años, la mejor forma de conseguir una imagen más fidedigna de la composición del núcleo fue proyectando distintas radiaciones sobre el mismo para intentar descomponerlo en sus partes





*Fig. 4.61. Desintegración de un núcleo de nitrógeno por medio de partículas alfa. PMS. Blackett. c.a. 1932.*

más elementales. En 1917, el propio Rutherford logró este objetivo al desintegrar átomos de nitrógeno con la proyección de partículas alfa provenientes de una porción de radio C. La desintegración se pudo observar en los efectos producidos por los haces de partículas sobre una pantalla de sulfuro de zinc que utilizó a modo de centelleador, y posteriormente en fotografías (Figura 4.61). La interpretación dada por Rutherford a este fenómeno, fue que las partículas  $\alpha$  tienen la capacidad de extraer los núcleos de hidrógeno, responsables directos de la producción de los destellos en la pantalla. Y que las partículas  $\alpha$  pueden penetrar fácilmente en el núcleo de hidrógeno, debido a las pocas capas de

electrones que presenta este tipo de átomo a su alrededor. Esta experiencia confirmó la existencia de una nueva partícula: el núcleo de hidrógeno, que posteriormente fue denominado *protón* (ver Figura 3.27).

Entre el gran número de científicos dedicados a estas tareas, destacó la figura de James Chadwick, un colaborador de Rutherford, que estudió con gran dedicación la desintegración de núcleos de otros elementos. Sus trabajos le condujeron a postular en 1932, la existencia de una nueva partícula emplazada en el mismo corazón del átomo, el *neutrón*. Intrigado por la emisión de radiaciones de alta intensidad que algunos elementos, como el berilio, presentan al ser bombardeados con rayos alfa, y basándose en una serie de experimentos en esta misma dirección llevados a cabo unos meses antes por Bothe y Becker, e Irene Curie y Frederic Joliot, comenzó a estudiar este tipo de rayos emitidos por el berilio en una serie de sustancias. Su forma de colisionar, su propagación y su velocidad fue lo que llamó más su atención. Una vez que pudo constatar el gran poder de penetración de estas partículas y su nula desviación ante la presencia de campos eléctricos, dedujo que debía tratarse de una nueva partícula de carga neutra y constituyente del núcleo<sup>80</sup>. La forma de detección de esta nueva partícula fue en un principio por medio de contadores de válvula muy precisos, contruidos con una pequeña cámara de ionización conectada a un amplificador cuya señal de salida quedó registrada por un oscilógrafo<sup>81</sup>. Pero no hubo que esperar demasiado para que sus trazos quedaran



*Fig. 4.62. Colisión de neutrón con átomo de helio. Curie- Joliot. 1932.*



*Fig. 4.63. Neutrón colisionando con átomo de nitrógeno. Curie- Joliot. 1932.*

recogidos por placas fotográficas asociadas a cámaras de niebla, gracias al trabajo, entre otros, de la pareja Curie- Joliot<sup>82</sup>. (Figura 4.62., 4.63. y 4.64.).

En el proceso de descubrimiento de las partículas atómicas se ha producido un continuo vaivén entre la experimentación y la teoría. En numerosas ocasiones han sido los modelos teóricos los que han vaticinado con acierto la existencia de una u otra partícula, normalmente, en base al conocimiento previo y a la aparición de pruebas experimentales



desestabilizadoras de los modelos anteriores. No es menos cierto que la confirmación de estos modelos hipotéticos y de la existencia de nuevas partículas, se ha producido habitualmente mediante nuevas observaciones facilitadas por algún tipo de técnica de producción de imágenes, entre las que ha destacado tradicionalmente la fotografía de sales de plata. En este contexto, son dignas de mención las palabras del físico Ettore Majorana: “*Mira qué idiotas, han descubierto el protón neutro, y no se han dado ni cuenta*”<sup>83</sup>, emitidas por este físico italiano ante los experimentos de Curie- Joliot, cercanos al hallazgo de Chadwick, como ejemplo de hasta donde puede llegar el valor premonitorio de la teoría. Esta anticipación a los hechos por parte de los teóricos, se ha repetido a lo largo de la historia. Son clásicos los ejemplos de Wolfgang Pauli, anunciando en 1931 la existencia del



Fig. 4.64. Neutrón entrando desde abajo a través de una lámina de parafina. Y colisión con átomo de helio. Curie-Joliot. 1932.

Fig. 4.65. Recorrido de un positrón. Chadwick, Blackett y Occhialini. c.a. 1930.



neutrino, años antes de que pudiera ser detectado en el interior de un reactor nuclear (1956); o la del *positrón*, establecido por Paul Dirac en 1928, y fotografiado por Carl Anderson en 1932 (Figura 4.65, y ver Figura 3.26.), o la del *mesón*, enunciado por Hideki Yukawa en 1935, y fotografiado por C. D. Anderson y S. H. Neddermeyer dos años más tarde, y por C. F. Powell y otros autores a partir de 1940 en sus distintas variedades (Figura 4.66 y 4.67.); o la de los *quarks*, postulados por Murray Gellman como entes puramente ficticios en 1962, y fotografiados en 1969 y 1974<sup>84</sup> (Figura 4.68.). El exceso de confianza en la teoría por parte de

muchos científicos de los años de entreguerras, respaldada por modelos matemáticos, originó un retorno a posiciones excesivamente puristas y de corte neoplatónico que avivaron los enfrentamientos con los más proclives al atomismo y la experimentación. Las cuestiones de carácter epistemológico relativas al

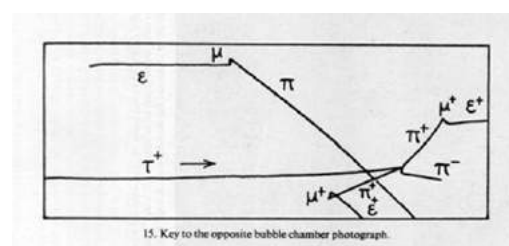
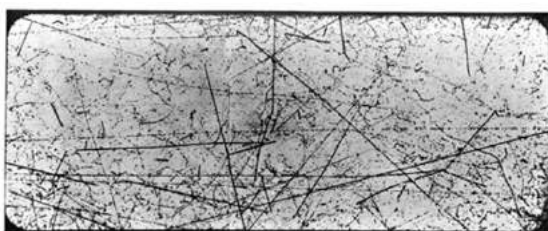
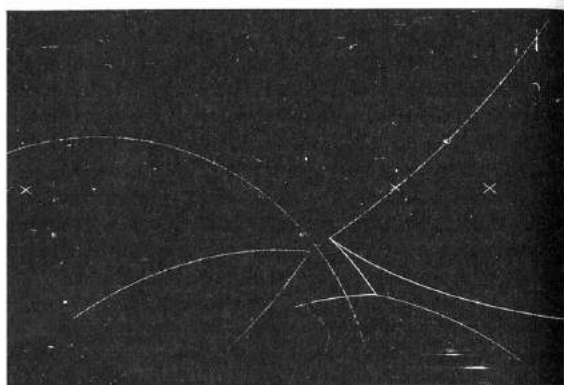


Fig. 4.66. y 4.67. Mesones en cámara de burbujas. Un tau mesón se divide en tres pi- mesones, y éstos se subdividen a su vez.. Y diagrama interpretativo.

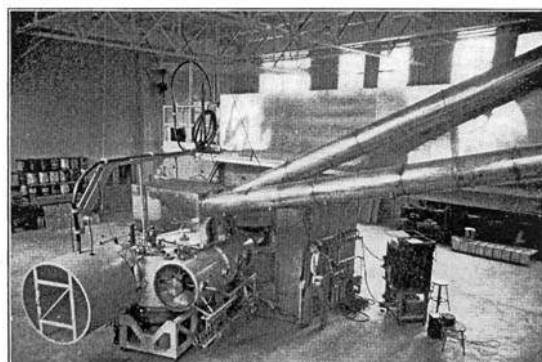
método científico y al valor de los principios y leyes de la ciencia representó el eje de las discusiones. El ejemplo de Pauli, dudando de la existencia de sus propios neutrinos, juzgando incluso de innecesaria su manifestación en la vida real, es el caso tal vez más emblemático de esta tendencia.

*En el campo que Pauli predijo erróneamente el futuro, es difícil que podamos prever los problemas que se estudiarán dentro de unos años. Sin embargo, podemos intuir que las nuevas posibilidades de*

*observación contribuirán profundamente a la comprensión de las interacciones de estas partículas, probablemente el material más abundante y presente en la naturaleza.<sup>85</sup>*



**Fig. 4.68.** *Un protón y un antiprotón chocan a altas energías y producen un par de quarks casi libres. CERN. 1974.*

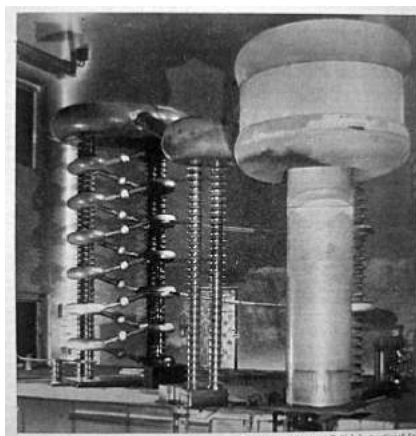


**Fig. 4.69.** *Ciclotrón de 60 pulgadas. Univ. California. Berkeley. 1932.*

En el mismo año de 1932, año emblemático de la ciencia por la detección del neutrón y del positrón, comenzó la construcción de los primeros aceleradores de partículas. La dificultad para avanzar en la obtención de fuentes de radiaciones de mayor intensidad que los rayos cósmicos, y más prácticas y controlables, unido a la fuerte necesidad de avanzar en el estudio de la desintegración atómica, fueron razones que impulsaron este tipo de proyectos. Los primeros en aparecer fueron el ciclotrón de la Universidad de California, diseñado y construido por E. O. Lawrence y M. S. Livingston (Figura 4.69); y el de 500 kilovoltios, del Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, construido por J. D Cockcroft y E. T. S. Walton (Figura 4.70.).

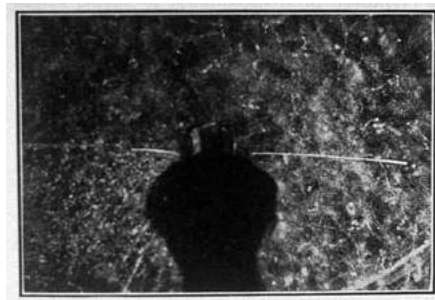
*El descubrimiento del neutrón por Chadwick, junto con la teoría de Fermi sobre la radioactividad beta, y los aceleradores de Cockcroft y Walton, y de E. O. Lawrence, abrieron la era de la física nuclear moderna.<sup>86</sup>*

El acelerador de Cockcroft- Walton fue preparado para acelerar protones, ser disparados contra los núcleos de distintos elementos. El objetivo principal era provocar la transmutación de éstos, tal como quedó patente en las fotografías proporcionadas por una cámara de niebla empleada como detector de estas reacciones<sup>87</sup> (Figura 4.71. y 4.72). Para 1935, comenzó a ser construido en el MIT (Massachusetts Institute of Technology), de Estados Unidos, el acelerador de protones Van de Graaff, espléndidamente fotografiado en 1938 por Berenice Abbott, una de las figuras más emblemáticas de la historia de la fotografía (Figura 4.73. Foto de portada)<sup>88</sup>. El modelo seguido en su construcción es compartido por el conjunto de aceleradores edificados a lo largo de la historia, revelando una estructura y



**Fig. 4.70.** *Acelerador del laboratorio Cavendish. 1932.*

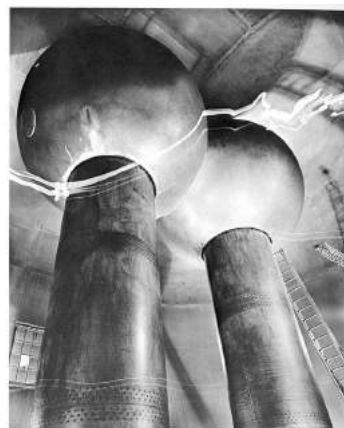
funcionamiento muy afín a los principios de la óptica electrónica. Constaba de dos partes bien diferenciadas, en este caso, separadas por el suelo existente entre dos salas ubicadas en pisos contiguos. En la parte superior se encontraba el acelerador propiamente dicho, que fue diseñado para producir fenómenos de dispersión provocados por el enfrentamiento de protones contra protones (Figura 4.74.). El haz era acelerado por una fuente de iones emplazada en una sala anexa, probablemente donde las fotografías de Abbott fueron tomadas. Y en la planta inferior, siguiendo el eje de la trayectoria del rayo de protones, se encontraba la sala equipada del electroimán deflector del haz, y responsable asimismo de separar los protones del resto de partículas; así como de los instrumentos de medición y observación, osciloscopios y cámara de nieblas fundamentalmente (Fig. 4.75.). Este esquema de operación se mantiene vigente hasta nuestros días. Las mejoras e innovaciones producidas a lo largo de los años no han afectado sustancialmente la división existente entre un primer



*Fig. 4.71. Desintegración del diplon.  
P. I. Dee, E. T. S. Walton. c.a. 1930.*



*Fig. 4.72. Desintegración del litio.  
P. I. Dee, E. T. S. Walton. c.a. 1930.*



*Fig. 4.73. Acelerador Van de Graaff. 1935. Foto de Berenice Abbot, 1938.*

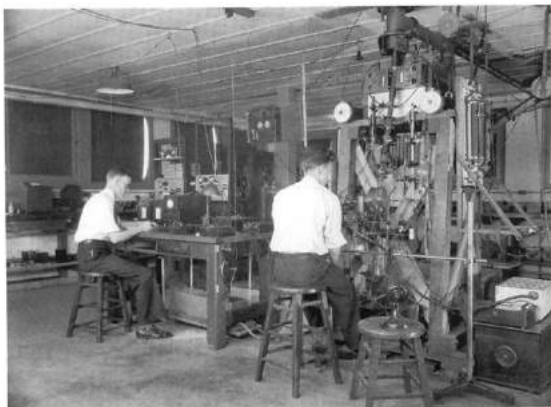


*Fig. 4.74. Acelerador Van de Graaff. Piso superior.*

proceso en el que se produce propiamente la aceleración, gracias a un generador de corriente y a un electroimán, responsable de la aceleración de las partículas; y una segunda fase, protagonizada por la presencia de otro campo magnético, responsable de la deflexión del haz, y de sus características más relevantes como diámetro, intensidad, polarización, foco, etc.; más la participación de los oportunos detectores.

Mirando hacia atrás en la historia, podemos ver que se han dado fundamentalmente dos tipos de aceleradores, dependiendo de si las partículas son aceleradas por medio de la producción de una diferencia de potencial muy elevada, hasta millones de voltios, como es el caso de los aceleradores electrostáticos tipo Van de Graaff y Felici, o del acelerador de Cockcroft y Walton, que lo consigue con un multiplicador de tensión; o mediante la aceleración progresiva de las partículas mediante sucesivos campos magnéticos situados en su trayectoria. En este caso, el sistema obliga a la partícula a seguir un camino en forma de espiral, o lineal, como es el caso de los ciclotrones, betatrones, sincrotrones, o sincrociclotrones.





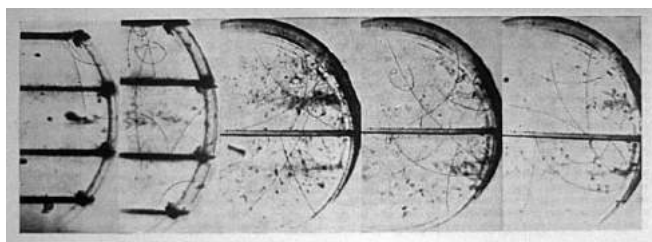
*Fig. 4.75. Acelerador Van de Graaff. Sala de instrumentación.*

La carrera armamentística avivada por la proximidad de una guerra anunciada, incentivó de forma espectacular la construcción de reactores atómicos y de aceleradores y detectores de partículas. Los centros de investigación, tanto académicos como los pertenecientes a la industria, se volcaron en todo tipo de proyectos considerados vitales para el desarrollo de la contienda, tales como el radar y las tecnologías ligadas a la generación de microondas, los cohetes, o el más decisivo y apremiante de la construcción de la bomba atómica. Los aceleradores de partículas, en este contexto, proliferaron por toda la geografía de los

países más industrializados a la carrera por lograr la mejor forma de producir y controlar la fragmentación del núcleo atómico. Para entonces era de sobra conocida la capacidad de la fisión para la generación de energía. Enrico Fermi manifestó en 1932 que los neutrones eran las partículas que mejor se adaptarían para romper el núcleo, por que al carecer de carga alguna no serían repelidos por las órbitas electrónicas. Dos años después, en 1934, la pareja Joliot -Curie comprobó con este procedimiento que los núcleos residuales de las desintegraciones eran radiactivos a su vez. Al año siguiente, Yukawa formuló la existencia del mesón, al aplicar las leyes del electromagnetismo de Maxwell a los procesos ocurridos entre las partículas del interior del núcleo, con lo que aportó claves esenciales para el conocimiento del átomo. En 1938, próximos al inicio de la guerra, Hahn y Strassmann lograron la fisión del núcleo de uranio. Al año siguiente, estallada la guerra, varios científicos, entre ellos Fermi, Joliot, Halban y Kovarski, lograron la fisión del núcleo de varios elementos radiactivos y la reacción en cadena de esta desintegración, con lo que se encontró una forma viable de producción de energía, que fácilmente podría ser empleada con fines de destrucción. Durante la contienda, la mayoría de los científicos ligados a la física nuclear, tanto de un bando como de otro, apoyaron los proyectos de construcción de la bomba. En el lado de los aliados, se formó un grupo liderado por figuras como Enrico Fermi y Werner Oppenheimer; y en el lado del eje, destacó la presencia de Werner Heisenberg. El desenlace de la guerra, con el lanzamiento de las primeras bombas atómicas sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki es de todos conocidos. Es sintomático e ilustrativo del panorama científico- tecnológico y político nacido tras el final de la guerra, el hecho de que Oppenheimer fuera llevado ante los tribunales por su supuesto filocomunismo, y que fuera apartado de los puestos de mayor responsabilidad en la investigación nuclear en Estados Unidos; cuando Heisenberg adquirió gran notoriedad pública, ocupando puestos claves en la dirección de la política nuclear de su país<sup>89</sup>. El modelo de investigación científica nacido tras la guerra, adquirió la impronta traída por estos años de estrecha alianza entre ciencia y guerra, por lo que el modo de operar y la estructura de los laboratorios más sobresalientes y líderes a partir del final de la contienda, tanto en el este como en el oeste, siguieron un modelo militar, caracterizado por la jerarquía y el secretismo de las operaciones<sup>90</sup>. La dependencia de la ciencia de las necesidades militares llegó con la guerra fría a niveles desorbitados, situación que pervive hasta nuestros días, sin vistas de remisión. El elevado coste de la investigación en áreas tan determinantes para el desarrollo científico, como los propios aceleradores, las cámaras de burbujas, y destellos, la fabricación de componentes electrónicos, la ingeniería mecánica y aeronáutica, los proyectos espaciales, o la informática, ha potenciado la dependencia de los proyectos científicos de los fondos estatales y gubernamentales estrechamente ligados a la

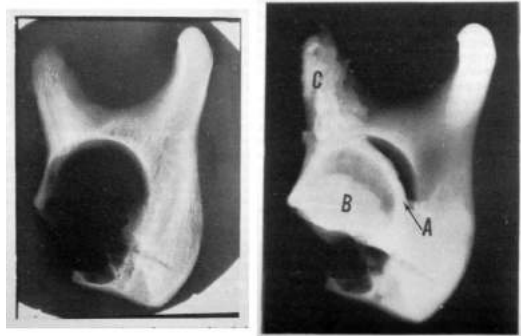


industria y a las necesidades militares de las grandes potencias. Gran parte de los proyectos de investigación científica de vanguardia, desarrollados desde el final de la guerra, se han llevado a cabo dentro de centros ligados a la defensa nacional, o en empresas con contratos suscritos con el ejército. La información clasificada y el secretismo en torno a proyectos científicos, ligados mayormente a la física nuclear, han sido moneda corriente en el devenir de la ciencia de la segunda mitad del siglo XX. El control de la información en este sentido, creció paralelo al ejercido en los medios de comunicación de masas para noticias de toda índole.



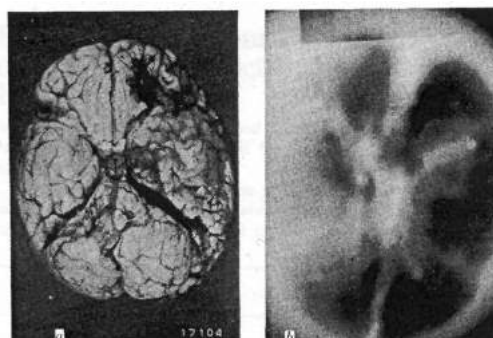
*Fig. 4.76. Electrones rápidos producidos por un betatron. 1947.*

Tras la guerra, las inversiones económicas en la construcción de aceleradores crecieron de forma extraordinaria. Hay que tener presente de que se trataba de un tipo de instrumentación científica de una envergadura desconocida hasta entonces, que sobrepasó las dimensiones normales de cualquier laboratorio en cuanto a tamaño, equipos o personal. Los aceleradores construidos antes o durante la guerra, se destinaron en los años de contienda a investigaciones relacionadas con los proyectos de energía atómica. Tal fue el caso del acelerador del Cavendish, que además de estas tareas, prestó servicio a las numerosas experimentaciones de C. F. Powell en el campo las emulsiones fotográficas nucleares, para detección y registro de partículas con cargas y de neutrones<sup>91</sup>.



*Fig. 4.77. Radiografía de neutrones de tumor óseo (dcha); y de rayos X (izda) 1971.*

comenzaron a proyectar sus haces sobre las emulsiones fotográficas (Figura. 4.76.) con la ayuda de osciloscopios y pantallas fluorescentes. Estos instrumentos fueron clave para la visualización de las señales relativas a las operaciones de encendido, control de los campos magnéticos, medidas procedentes de los espectrómetros, emisión de pulsos, etc., que a su vez quedaban convenientemente registradas en películas fotográficas<sup>92</sup>. Conviene reseñar que a partir de la década de los setenta, comenzaron a desarrollarse diferentes tipos de técnicas radiográficas fundamentadas en la proyección de partículas como neutrones y protones acelerados, provenientes de reactores y aceleradores, o de elementos radiactivos, sobre los distintos especímenes u órganos que se precisaba visualizar, como ampliación y mejora de las técnicas radiografías convencionales por rayos X. Los aceleradores de construcción más compacta están abriendo hoy día un nuevo campo de producción de imágenes, de especial relevancia en el estudio de los seres vivos<sup>93</sup> (Figuras 4.77., 4.78. y 4.79.); e incluso en operaciones de carácter



*Fig. 4.78. Radiografía de protones (positivo) del cerebro, con oclusión trombótica. 1973.*

micromecánico, para tareas de restauración de materiales y obras de interés documental y artístico. En este contexto, cabe destacar entre otros, los trabajos de restauración de las primeras fotografías de Fox Talbot, llevados a cabo por E. Ostroff<sup>94</sup>.

Para 1950, la detección de nuevas partículas mediante el registro fotográfico del trazo producido por radiaciones cósmicas, descargas producidas en cámaras de niebla, o por haces radiactivos, había ofrecido sustanciosos frutos. Al neutrón, positrón y protón, se le sumaron los mesones ( $\pi$ - mesón, y K- mesón), y los hiperones, partículas muy efímeras, con tiempo de vida del orden de la millonésima parte de un segundo<sup>95</sup>. Las fuerzas de la naturaleza quedaron definidas en

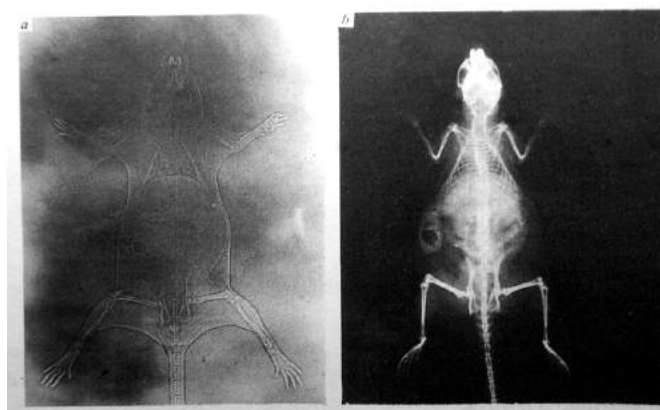


Fig. 4.79. Radiografía de protones y de rayos X respect. 1972.

cuatro apartados bien definidos, una vez que se llegó a este estado de conocimiento de la materia. A la fuerza de la gravitación y del electromagnetismo, cuyas unidades definitorias son el *gravitrón* y el *fotón* respectivamente, se le unieron las fuerzas atómicas, una de carácter *fuerte* que es la que mantiene unido el núcleo atómico, tal vez la de mayor potencia, y cuya unidad es el  *$\pi$ - mesón*; y otra *débil*, responsable de las interacciones efímeras observadas dentro del propio núcleo, y cuya unidad es el *bosón*. Los primeros aceleradores consiguieron detectar una partícula nueva, el *pion*; pero las limitaciones comenzaron pronto a aparecer en todos estos frentes de exploración por lo que se hizo necesario construir nuevos aceleradores de mayor

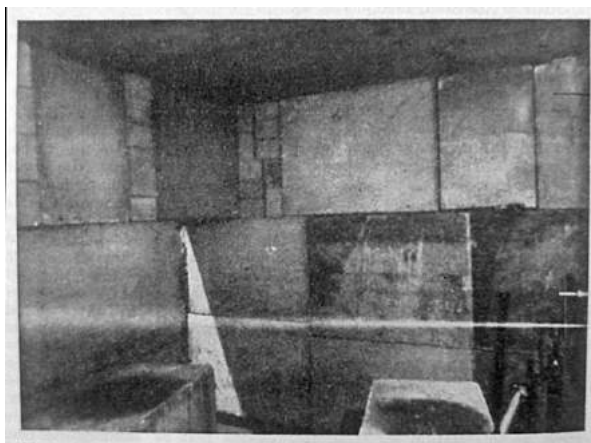


Fig. 4.80. Interior de la cámara del ciclotrón de la Univ. de Birmingham, que muestra un rayo de 20 MeV de deuterones, 1952.

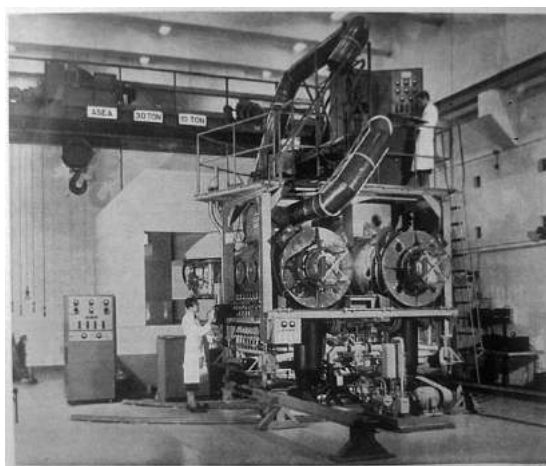
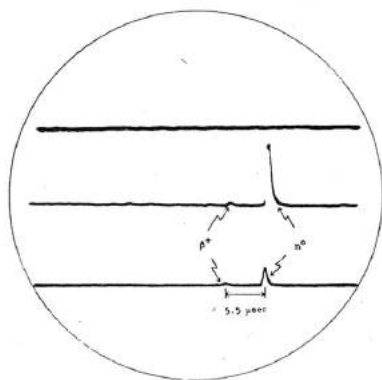


Fig. 4.81. Ciclotron del Nobel Institute fur Physiks, Estocolmo. 1952.

potencia. Esto se consiguió con el Cosmotrón, de Brookhaven (Nueva York), construido en 1952, y con el Bevatron de Berkeley, California, construido en 1954, ambos protón- sincrotrones. A partir de 1954, se comenzó la construcción del primer acelerador europeo en el CERN, Centro Europeo para la Investigación Nuclear, situado en Ginebra, al que siguieron otros muchos, repartidos por la Unión Soviética y el resto de países más industrializados. (Figura. 4.80., 4.81., 4.82.)

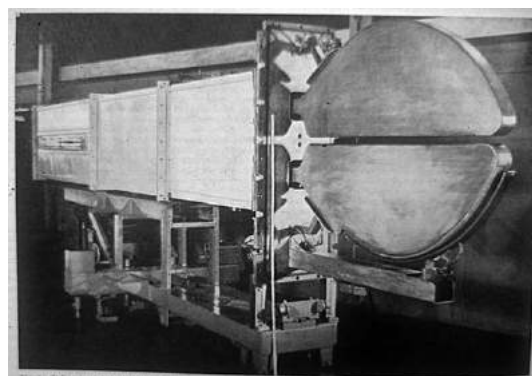
Para mediados de siglo, la cámara de niebla comenzó a presentar serias limitaciones para ser utilizada en esta nueva generación de aceleradores. La razón fundamental de su paulatino abandono fue su lentitud de respuesta, motivo por el que comenzó a ser sustituida por la cámara de burbujas, desarrollada por D. A. Glaser en 1952.

Los aceleradores de alta energía en forma de anillos, comenzaron a ser más demandados, a la par que fueron desarrollándose los contadores de fracciones de tiempo del orden de milimicrosegundos. Estos dispositivos abrieron un campo de exploración inmenso al estudio de las partículas efímeras cada vez más numerosas, como el propio neutrino, registrado fotográficamente en 1956 en la pantalla de un osciloscopio perteneciente al reactor nuclear de Savannah River Plant, Estados Unidos<sup>96</sup> (Figura 4.83). Igualmente se detectaron las primeras antipartículas: anti -protones y anti-nucleones<sup>97</sup>.

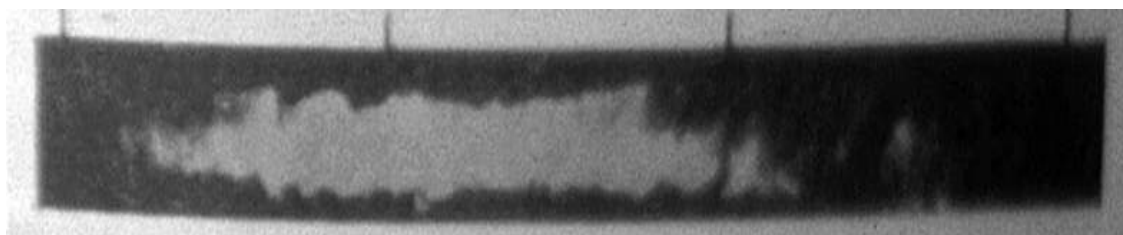


*Fig. 4.83. Trazos de osciloscopio pertenecientes a una manifestación del neutrino. Lab. Los Alamos Reines, F. Cowan, C. L. 1956.*

La aparición de nuevas técnicas de generación de partículas en tiempos muy breves, asociadas a estos contadores y generadores de pulsos eléctricos, abrió un nuevo período de investigación en el campo de la física nuclear en el que la fotografía de alta velocidad o la estereoscópica han desempeñado un papel de primer orden. Valga tener presente avances como la determinación del espectro de neutrones generados en una cámara de niebla de alta presión, asociada al reactor termonuclear Zeta, de Harwell, Inglaterra, por medio de la medición de los trazos de los protones rebotados, finalmente registrados en estereofotografías<sup>98</sup>; las fotografías de alta velocidad por técnica de *barrido* (streak photography), el espectro ocasionado por las descargas de helio en este mismo reactor (Figura 4.84.); o el perteneciente a las descargas de hidrógeno producidas en el Levitrón de Berkshire (Figura 4.85.), máquina generadora de pulsos ultrarrápidos en plasma para el estudio de las partículas<sup>99</sup>. Este tipo de máquinas, denominadas de *constricción*, comenzaron a ser utilizadas también en la producción de neutrones en pequeñas cantidades, pero de alta intensidad, cuyos efectos fueron recogidos por centelleadores asociados a espectrómetros, y por osciloscopios, además de las técnicas fotográficas mencionadas<sup>100</sup>. Las técnicas de generación de campos magnéticos de gran intensidad producidos en intervalos de tiempo extremadamente cortos tienen sus antecedentes en los trabajos emprendidos en

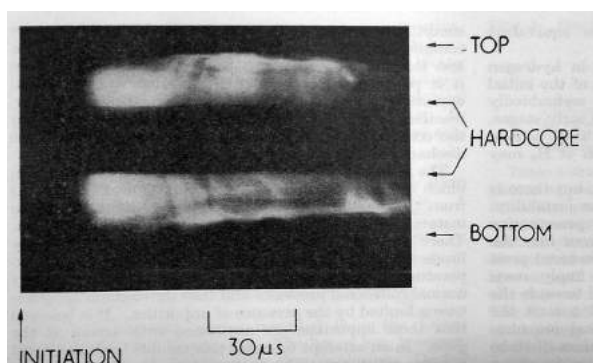


*Fig. 4.82. Ciclotrón del laboratorio Oak Ridge. 1954.*



*Fig. 4.84. Fotografía de alta velocidad con técnica de barrido (Streak photo) de una descarga de helio. Reactor termonuclear Zeta, Harwell. 1958.*

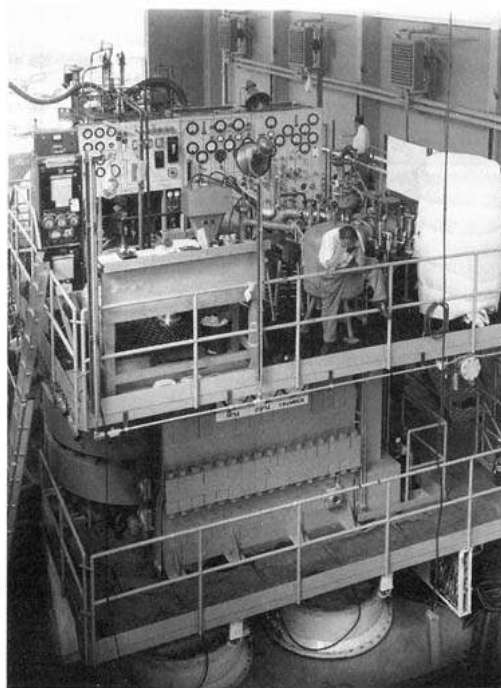




**Fig. 4.85. Fotografía de alta velocidad con técnica de barrido de una descarga de hidrógeno en un Levitron. 1963.**

1927 por Peter L. Kapitza en el laboratorio Cavendish. En aquel entonces, se consiguió generar pulsos de milisegundos mediante energía almacenada en baterías y generadores rotatorios<sup>101</sup>. A un mismo tiempo, la década de los sesenta asistió al nacimiento de la producción de campos magnéticos de alta intensidad de tipo continuo, especialmente a raíz del interés de la ciencia por los fenómenos de resonancia producidos en distintos materiales semiconductores<sup>102</sup>.

La cámara de burbujas supuso un salto cualitativo de gran envergadura en la investigación científica llevada a cabo con los aceleradores. Como he comentado anteriormente, la cámara de niebla resultó ser demasiado lenta para la velocidad con la que se producían las partículas y para el trazo de sus trayectorias esquivas y de múltiples choques. La cámara de niebla estaba limitada a una fotografía cada dos o tres minutos, cuando los nuevos aceleradores producían descargas de partículas cada dos o tres segundos<sup>103</sup>. La cámara de burbujas palió esta limitación al utilizar hidrógeno, propano o helio líquido, llevados a altas temperaturas en tiempos reducidos, fenómeno que se hacía coincidir con la producción del haz de partículas, o con el choque entre ellas. Este proceso permitió realizar múltiples fotografías de las pequeñas burbujas de ebullición que forman las propias partículas en su trayectoria a través del líquido transparente. El establecimiento de este nuevo binomio: acelerador- cámara de burbujas, inauguró un nuevo modelo de investigación en la ciencia, caracterizado por el uso de recursos, tanto técnicos como humanos, de unas proporciones hasta entonces inimaginables (Figura 4.86.). La informática entró a formar parte de este instrumento fastuoso para facilitar las tareas de control de las operaciones y para procesar la gran cantidad de información procedente de la ingente producción de fotografías que era llevada a cabo en cada experimento. Para hacernos una idea de las dimensiones que adquirieron estos *reportajes fotográficos*, basta tener presente, a título de ejemplo, que la cámara de burbujas destinada al acelerador protón- sincrotrón del CERN, a principios de los sesenta, generó un millón de fotografías con el uso de rayos de protones, piones y mesones  $K^\pm$ <sup>104</sup>. O que el acelerador de protones de Brookhaven, consiguió detectar en 1969, las nuevas partículas conocidas como  *$\Xi$ - star resonances*, tras tomar 700.000 fotografías, de las que se obtuvieron las pistas necesarias en 150 de ellas.



**Fig. 4.86. Cámara de burbujas de 72 pulgadas del laboratorio Lawrence Berkeley. University of California. 1959.**



*En verdad, las imágenes actuales deberían ser adscritas más a la escuela impresionista que al firme terreno de la representación exacta*<sup>105</sup>.

El universo de las partículas comenzó a expandirse más y más, adoptando unas dimensiones verdaderamente laberínticas y complejas al incorporar todas aquellas que se producen de forma inestable, en franjas de tiempo reducidísimos; o también, al tenerse en cuenta el campo coexistente de las antipartículas, y al comprobarse que muchas de las consideradas hasta entonces *elementales*, como es el caso de los neutrones y protones, en realidad están compuestas de otras menores, bautizadas desde 1969 con el nombre de quarks. Una nota de James Joyce, perteneciente a su *Finnegan's Wake*, inspiró al físico Murray Gellman para estructurar un universo nuevo, lleno de partículas de distintos *sabores* (up, down, strange, charmed, bottom y top), y de distintos *colores* (RGB), cuya exposición en detalle sobrepasa las intenciones de este trabajo. Los conceptos de los *estados de resonancia*, descritos por Fermi, el de *spin isotópico*, o el de *simetría e hipercarga*, formulados por Gellman y Nishijama, se sumaron a este entramado, para delimitar la realidad de cada una de las partículas y para proponer la existencia de otras nuevas. En términos de observación, nos encontramos en la actualidad con dos grupos bien definidos de partículas, aquellas que son directamente observables por cualquiera de los procedimientos hasta ahora reseñados, y aquellas otras que conocemos a través de su fuerza ejercida sobre otras, o sobre los instrumentos de medición.

*Se dice que las partículas portadoras de fuerza, que se intercambian entre sí las partículas materiales, son partículas virtuales porque, al contrario que las partículas reales, no pueden ser descubiertas directamente por un detector de partículas. Sabemos que existen, no obstante, porque tienen un efecto mensurable: producen las fuerzas entre las partículas materiales.*<sup>106</sup>

Las fotografías de anti- deuterones, de las partículas  $\Omega^-$ , o de los propios quarks, producidas a lo largo de estos últimos años, entran a formar parte de este juego dialéctico, imperecedero, que se da entre la experiencia y la teoría, como piezas irrefutables del mundo material del que somos parte<sup>107</sup>.

## Notas del capítulo 4

1 El físico norteamericano, Joseph Henry, quizá sea el primer científico que detectó en 1842, la naturaleza oscilatoria de la descargas eléctricas. Años más tarde, en 1861, Berend W. Feddersen comprobó un efecto similar al observar una serie de chispas intermitentes que se producían con la descarga de un condensador, hecho que recogió sobre una placa fotográfica con la ayuda de un espejo giratorio. En esta línea de trabajo, David E. Hughes, uno de los artífices de las primeras formas de telégrafo eléctrico, observó en 1878, que un contacto inestable en un circuito eléctrico provocaba una serie de ruidos en un receptor telefónico, hecho que sirvió de inspiración para la construcción de los primeros micrófonos de carbón y para encontrar una forma de detección a distancia de las señales oscilatorias. Op. cit. *Del semáforo...* p 120.

2 Cuevas, José. *Historia de las telecomunicaciones* (Documental). AHCIET, 1996.

3 Op. cit. *Señales*. p 141- 2.

4 Op. cit. *Del semáforo...* p 134.

5 Op. cit. Hey. p 1.

6 Lovell, A. C. B. *The New Science of Radio Astronomy*. Nature, 20 de enero de 1951. p 94-5.

7 Op. cit. Ingram, p 1146.

8 Ibid. p 7.

9 Op. cit. Zworykin- Ramberg. *Photo- Electricity*. p 1.

10 Anderson, John, S. *Photo- Electric Cells and their Applications*. The Physical and Optical Societies. 1930. p 11. (Traducción propia)

11 Burke, Michael W. *Image Acquisition*. Chapman Hall. 1996. p 541. (Traducción propia)

12 Louis de Broglie nos resume de forma ejemplar la gestación de la teoría del efecto fotoeléctrico a cargo de Einstein: “*Del mismo modo que la física clásica no pudo interpretar con sus principios la distribución espectral relativa a la energía irradiada por un cuerpo negro, tampoco pudo hacerlo de la liberación de electrones, fruto de la incidencia de la luz o de otras radiaciones. Einstein dio una explicación de este último fenómeno en términos de la teoría cuántica. La liberación de los electrones se produciría en cuantos, en la misma medida, y de forma lineal, que la radiación incidente. La hipótesis esencial de Einstein es que, en toda radiación monocromática de frecuencia  $\nu$ , la energía radiante no está uniformemente repartida como lo suponía las teorías ondulatorias clásicas de Fresnel y de Maxwell, sino que está concentrada bajo forma de granos cuyo contenido energético es  $h\nu$ , siendo  $h$  la constante de Planck, que como en la forma primitiva de la teoría de Planck, sirve aquí para definir un quantum de energía; son estos granos de energía radiante lo que Einstein denominó entonces quanta de luz y nosotros llamamos hoy fotones*”. Broglie, Louis. *Por los senderos de la ciencia*. Espasa Calpe. 1963. Edición original: 1960. París. pp137.

13 Op. cit. Burke. p 540.

14 Stanley Allen, H. *Photo- Electricity. The Liberation of Electrons by Light*. Longmans, Green and Co, 1913. p 9.

15 Op. cit. Allen. p 7.

- 16 Op. cit. Zworykin. *Photoelectricity*... p 114.
- 17 Se acepta el término deflexión en deferencia al trabajo de traducción realizado por Ernesto Sábato de la obra en alemán, de Lipfert, Kurt. *La televisión*. Espasa Calpe, 1940.
- 18 Op. cit. Shiers. p 100.
- 19 El desarrollo de este tema concerniente a la imagen producida por los tubos de imagen, especialmente por el osciloscopio y la televisión, y de sus correspondientes usos científicos, se llevará a cabo en mayor detalle en los próximos capítulos.
- 20 Ver Cap. 2.8.2. La fotometría.
- 21 Ver Cap. 2.8.2. La fotometría.
- 22 Mumford. Lewis. *Técnica y civilización*. Altaya, S. A., 1998. [“Technics and Civilization”. Harcourt, Brace & World, Inc., 1963]. p 470- 1. Y Op. cit. Zischka. p 399- 401.
- 23 Op. cit. Shiers. p 94.
- 24 Ibid. p 96. (Traducción propia)
- 25 Ibid. p 96. (Traducción propia)
- 26 Ibid. p 14. (Traducción propia)
- 27 Ibid. p 41.
- 28 Op. cit. Sánchez Ron. *Curie*. p 249.
- 29 Born, Max, Fürth, R, y Pringle, R. W. *A Photo- Electric Fourier Transformer*. Nature, 22 de diciembre de 1945. p 756 y 757.
- 30 Hoadley, H. W. *Scientific Applications of Photography*. En Neblette’s Handbook of Photography and Reprography. Materials, Processes and Systems. Ed. John M. Sturge. Van Nostrand Reinhold Company, 1977. p 564- 71.
- 31 Schackel, B, y Watson, G. R. *Closed- Circuit Televisión*. En C. E. Engel. *Photography for the Scientist*. Academic Press. 1968. p 602. (Traducción propia)
32. Ibid. p 553 y ss.
- 33 Op. cit. Zworykin-Ramberg. *Photoelectricity*. p 368.
- 34 Church, Archibald. *Recent Development in Television*. Nature, 30 de septiembre de 1933. p 502.
- 35 Aunque los usuarios se veían forzados a acudir a las estafetas de correo, si querían hacer uso de este sistema, no por ello, deja de tratarse de una primera forma de videoteléfono.
- 36 Op. cit. Lipfert. p 37- 41.
- 37 McGee, J. D. *Campbell Swinton and Television*. Nature, 17 de octubre de 1936. p 674.
- 38 Op. cit. *Del semáforo*. p 193.
- 39 Zworykin V. K.y Morton G. A. *Television. The Electronics of Image Transmission*. Wiley 1946.
- 40 Op. cir. Church. p 504.
- 41 Op. cit. Zworykin. p 233.
- 42 Bliss, J. L. *Photographic Recording of Television Images: A Review of Progress*. The Journal of Photographic Science, Vol. 2. 1954. p 45 y ss.
- 43 Magnetic Recording and Reproducing in Broadcasting. Nature, 24 de marzo de 1934. p 468.
- 44 La tecnología EVR (Electronic Video Recording), fue anunciada en Nature, el 2 de septiembre de 1967. p 1019. Esta sistema de grabación en pequeñas cintas

magnéticas, fue especialmente diseñado por CBS e Ilford Ltd., bajo contrato con la NASA, organismo interesado en registrar las imágenes pertenecientes a su programas espaciales; lo que no impidió que la industria acabara lanzándola al mercado para un uso educativo y de entretenimiento,

45 Op. cit. Schackel y Watson. p 574.

46 Op. cit. Zworykin. *Television*. p 297.

47 Ibid. p 586.

48 Op. cit. Burke. 576 y ss.

49 Ibid. p 578.

50 Op. cit. Boyle y Smith.

51 Excepto a niveles astronómicos, donde se han llevado experiencias decisivas relacionadas con el efecto Zeeman y la teoría de la relatividad, comentadas en páginas anteriores.

52 Zworykin, V. K., Morton, G. A., Ramberg, E. G., Hillier, J., Vance, A. W. *Electron Optics and the Electron Microscope*. John Wiley and Sons. 1946. p 65.

53 Ibid. p 33 y ss.

54 Cosslett, V. E. *Conference on Electron Microscopy*, Delft. nature, 17 de septiembre de 1949. p 481.

55 La microscopía óptica, en relación con la fotografía, hasta 1927, está ampliamente desarrollada en Op.cit. Cuevas. Cap 6.

56 Op. cit. Zworykin. *Electron Optics*.... p 81.

57 Wyckoff, Ralph, W. G. *The Electron Microscopy in Biology*. Nature, 6 de marzo de 1954. p 419.

58 Para evitar el uso de cifras con demasiados ceros, los microscopistas utilizan la *micra*,  $\mu m$  (la milésima parte de un milímetro); el *nanómetro*, *nm* ( la millonésima parte de un milímetro); o el *Angström*,  $\text{\AA}$ (la décima parte de un nanómetro)

5 En honor a la verdad, podemos encontrar el origen del microscopio electrónico en los primeros ensayos de Wiliam Crookes, de 1879, con los tubos de vacío, en los que se encuentran presentes los elementos básicos de este instrumento. Op. cit. Wyckoff. p 419.

60 Aballe, M. López Ruiz, J., Badía, J. M. y Adeva, P. (Coordinadores). *Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X*. CSIC y Ed. Rueda. 1996. p 5.

61 Ibid. p 3

62 Cosslett, V. E. *Electron Microscopy of Solid Surface*. Nature. 22 de noviembre de 1952. p 861.

63 Ibid. p 861.

64 *The Electron Microscope*. Nature. 2 de julio de 1932. p 28.

65 Op. cit. Wickoff. p 420. Y Op. cit Cosslett. *Solid Surfaces*...p 862.

66 Cosslett. V. E. *Electron Microscopy Conference*. Nature. 1 de enero de 1949. p 33.

67 Cosslett. V. E. *Co- Ordination of Light and Electron Microscopy*. Nature. 28 de mayo de 1960. p 672.

68 De Rosier, D. J. y Klug, A. *Reconstruction of Three Dimensional Structures from the Electron Micrographs*. Nature. 13 de enero de 1968. p 130.

69 Reed. R. *Progress in Electron Microscopy*. Nature. 29 de noviembre de 1947. p 763.



- 70 Op. cit. Ilford. p 26 y 38.
- 71 Echlin, P. y Fendley, J. A. *Future of Electron Microscopy in Biology*. Nature, 17 de agosto de 1973. p 409.
- 72 Hall, C. E. y Schoen, A. L. *Application of the Electron Microscope to the Study of Photographic Phenomena*. Abridge Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 790. p 128. p xi- xx.
- En este contexto, en España, destaca la labor de J. A. Aznárez, que ha estudiado intensamente la formación de granos y manchas en las emulsiones fotográficas, concretamente, en expsiciones muy largas, en la zona de la curva característica, relativa al fenómeno de la solarización. (Ver cap. 6.2.6)
- 73 *Dislocation on View. Solid State*. Nature. 11 de enero de 1969. p 125.
- 74 Predstige, E. B. y Yates, D. J. C. *Imaging the Rhodium Atom with a Conventional High Resolution Electron Microscope*. Nature. 10 de diciembre de 1971. p 345 y ss.
- 75 Philips. *Microscopía Electrónica*. www.feicompany.com. p 22.
- 76 *Seeing with Megavolts. Electron Microscopes*. Nature. 11 de abril de 1970. p 100.
- 77 Butler, C. C. *High- Energy Nuclear Physics. Achievements and Future Developments*. Nature. 22 de mayo de 1965. p 763.
- 78 Op. cit. Weinberg. p 85-6.
- 79 Ibid.. p 89.
- 80 Rutherford, E. *Origin of the Gamma Rays*. Nature. 26 de marzo de 1932. p 457.
- 81 Chadwick, J. *Possible Existence of a Neutron*. Nature. 27 de febrero de 1932. p 312.
- 82 Op. cit. Rutherford. p 458.
- 83 Op. cit. Weinberg. p 137.
- 84 En 1969, C. B. A. McCusker aseguró haber fotografiado los trazos producidos por un quark. Nature. 27 de septiembre de 1969. Posteriormente, lograron ser fotografiados en el CERN tal como aparece en la figura anexa.
- 85 Ramm, C. A. *Development of High Energy Neutrino Experiments at CERN*. Nature. 9 de marzo de 1968. p 918. (Traducción propia)
- 86 Op. cit. p 141. Weinberg.
- 87 Dee. P. I. *Disintegration of Lithium under Proton Bombardment*. Nature. 25 de noviembre de 1933. p 819. Y *Disintegration of Deuteron*. Nature. 14 de abril de 1934. p 564.
- 88 Abbott, Berenice. *Aperture Masters of Photography*. Aperture, 1988. p 59.
- 89 Cuevas, José. *Fotografía, voluntad e incertidumbre*. Area abierta N° 14, UCM, 2006.
- 90 Op. cit. Galison. Cap. 4.
- 91 Eurcham. W. E. *The One Million- Volt Accelerating Equipment of the Cavendish Laboratory, Cambridge*. Nature. 6 de septiembre de 1947. p 317.
- 92 Bosley, W. Craggs, J. D. y Nash, W. F. *Some experiments with Fast Electrons and Positrons Produced by a 20-MeV. Betatron*. Nature. 6 de diciembre de 1947. p 791.
- 93 Steward, V. W. y Koehler, A. M. *Proton radiographic Detection of Strokes*. Nature. 7 de septiembre de 1973. p 38 y ss.
- Boyne, P. J. y Whittemore, W. L. *Neutron Radiography of Osseous Tumours*.

- Nature. 16 de abril de 1971. p 461.
- West, D. y Sherwood, A. C. *Radiography with 160 MeV Protons*. Nature. 15 de septiembre de 1972. p 157 y ss.
- 94 Ostroff, Eugene. *Early Fox Talbot Photographs and Restoration by Neutron Irradiation*. The Journal of Photographic Science, Vol. 13, 1965. p 213 y ss.
- 95 Op. cit. Butler. p 765.
- 96 Reines, F. Cowan, C. L. *The Neutrino*. 1 de septiembre de 1956. p 446 y ss.
- 97 Pickavance, T. G. y Stafford, G. H. *High- Energy Nuclear Physics*. Nature. 21 de julio de 1956. p 115 y ss.
- 98 Rose, B. Taylor, A. E, y Wood, E. *Measurement of the Neutron Spectrum from Zeta*. Nature, 14 de junio de 1958. p 1630.
- 99 Allen, N. L, y otros. *The Associated Electrical Industries Levitron*. Nature. 13 de julio de 1963. p 123 y ss.
- 100 Hagerman, D. C. y Mather, J. W.- *Neutron Production in a High Pinch Apparatus*. Nature 25 de enero de 1958. p 226 y ss. Burkhardt, L. C. y Lovberg, R. H. *New Confinement Phenomena and Neutron Production in a Linear Stabilized Pinch*. Nature. 25 de enero de 1958. p 228 y ss.
- 101 Kolm, Henry H. *Advances in the Generation and Use of Very High, Continuous Magnetic Fields*. Nature. 8 de octubre de 1961. p 299.
- 102 Ibid. p 300.
- 103 Op. cit. Butler. p 765.
- 104 Ibid. p 766.
- 105 *New Subnuclear Particles*. Nature. 1 de febrero de 1969. p 413.
- 106 Hawking, Stephen W. *Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros*. Círculo de lectores. 1988. Título original: A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes. p 117.
- 107 Op. cit . Butler. p 766 y 767, respec.

## Capítulo 5. La fotografía y la imagen electrónica: la instrumentación. 1900- 1970.

*“La fotografía es el registro documental de un hecho experimental.”<sup>1</sup>*

J. A. Aznárez

Una vez analizado el conjunto de medios de observación y de producción de imágenes desarrollados hasta mediados del siglo XX, fundamentalmente aquellos de carácter manual, fotoquímico y fotoeléctrico, estamos en condiciones de abordar el extenso campo de aplicaciones científicas que ofrece la imagen tecnológica. En el transcurso de la historia, hemos comprobado cómo la imagen ha prestado un alto servicio a la investigación científica. De las primeras formas de representación, mayormente el dibujo y el grabado, que podemos considerar técnicas *quiroygráficas*<sup>2</sup>, hemos pasado a la fotografía en sus múltiples modalidades, técnica que llegó en el siglo XIX a establecer un nuevo modelo de interpretación iconográfica de la realidad, caracterizado por un nivel más alto de automatismo en las tareas de reproducibilidad técnica y por la utilización de los avances surgidos en el seno de la química, concretamente de la fotoquímica. Los cambios producidos por la acción de la luz en los niveles de opacidad, transmisión o color de una serie de materiales fotosensibles, son los que definen el modo de actuar de este sistema reprográfico. La fotografía de sales de plata, especialmente la del bromuro, dispuesta en una amalgama de gelatina en seco, representa uno de los procedimientos fotográficos de mayor trascendencia dentro del ámbito científico. En líneas generales, la fotosensibilidad de los distintos materiales fotográficos, especialmente placas y películas, ha sido ejemplarmente complementada con las aportaciones que ha brindado la instrumentación óptica presente en la cámara. Estos dos elementos, al unísono, han sido los principales responsables de la creación de un instrumento de observación y registro de los fenómenos naturales, como es el fotográfico, que ha tenido un impacto sin precedentes en la historia de la cultura humana, en áreas tan determinantes como la artística, la documental y la científica. En la actualidad, el procedimiento fotográfico convencional está sufriendo una serie de innovaciones y transformaciones que provienen de distintos ámbitos de la ciencia. En primer lugar, por la proliferación de nuevos materiales fotosensibles que han venido a enriquecer los procedimientos de carácter fotoquímico. En segundo orden, porque la imagen tecnológica en su conjunto ha llevado a la práctica múltiples mecanismos de producción y registro fotográficos como consecuencia de los avances ocurridos en el campo del electromagnetismo. El grado de perfeccionamiento y control al que se ha llegado en lo que respecta a la producción de la energía eléctrica y al comportamiento de sus partículas mínimas en el interior de la materia, ha posibilitado la creación de una serie de instrumentos científicos de adquisición y generación de imágenes, desarrollados principalmente a lo largo del siglo XX, entre los que hay que destacar la fotografía de carácter electrónico, analógica y digital. El panorama de la imagen tecnológica, por consiguiente, si lo comparamos con el del siglo XIX, se ha vuelto altamente complejo y enriquecedor, gracias a la convivencia que existe en la actualidad entre los múltiples instrumentos de visualización nacidos fundamentalmente de la fotoquímica y la fotoelectricidad. La heterogeneidad y riqueza del paisaje iconográfico se expande aún más cuando

vemos que la imagen se ha visto afectada por sectores tan determinantes de la sociedad moderna, como son las telecomunicaciones, la informática, la industria reprográfica y las artes gráficas. Las relaciones recíprocas que se establecen entre estos sectores industriales y tecnológicos en los que la producción de imágenes es una pieza fundamental, y los dos procedimientos fotográficos básicos, fotoquímico y fotoeléctrico, de imagen fija y en movimiento, nos impiden construir una mirada simplificadora y reduccionista de este universo tan pluridimensional. En otro orden de cosas, la llegada de los procesadores automáticos de información, y su incidencia en el campo de la producción de imágenes, están afectando profundamente a los valores, tanto formales como simbólicos de la fotografía en su conjunto. La *óptica activa*, tal como la define Paul Virilio<sup>3</sup>, resultante de estos procesos, y debida a la presencia de algoritmos matemáticos que permiten ir más allá de la visión facilitada por los medios ópticos convencionales, ha posibilitado la formación de un nuevo modelo de actuación dentro de la imagen tecnológica que trasciende la pasividad de las tecnologías anteriores.

Las palabras introductorias de José A. Aznárez son significativas de hasta qué punto el valor epistemológico que determina la fotografía tradicional de sales de plata, a la hora de la adquisición de conocimiento científico, está sufriendo una gran transformación motivada por la llegada de esta nueva realidad iconográfica multidisciplinar, y de una instrumentación que facilita la producción de un tipo de *imagen de síntesis*, como nueva forma de representación de la realidad, situada entre la praxis y la teoría.

### **5.1. Hacia una nueva concepción del fenómeno fotográfico**

Existen tres ayudas básicas que la fotografía presta a la ciencia. Una, hacer visible fenómenos que la visión humana no puede apreciar, ya sea por su tamaño diminuto, su lejanía, su franja espectral, o su velocidad; otra, permitir el estudio cualitativo de los fenómenos registrados; y una última, facilitar el análisis cuantitativo a partir de las mediciones que podemos hacer en las imágenes obtenidas<sup>4</sup>. Si partimos de la idea de que el fenómeno fotográfico trasciende el uso exclusivo del procedimiento de sales de plata, comprendemos que estas tres ayudas pueden aplicarse sin dificultad al resto de fórmulas que presenta la imagen tecnológica, tanto fotoquímicas como fotoeléctricas. En el ámbito científico, una imagen viene dada bajo múltiples formas: por el clásico papel o placa fotográfica procesados en un laboratorio convencional, un fax, un espectro, una radiografía, una *electronografía* (ver Cap. 5.6.1.), una emulsión nuclear, una copia xerográfica, o la pantalla de una televisión, un osciloscopio, una cámara de burbujas, o un acelerador de partículas.

Una vez provistos de una visión histórica de los hechos, vemos como el fenómeno fotográfico obedece a un proceso altamente dinámico, que va construyéndose a medida que avanza el tiempo. Los modelos de imagen tecnológica quedan delimitados por procedimientos de adquisición y producción de imágenes muy concretos. Estos, a su vez, han potenciado la creación de una serie de conceptos, términos, y principios explicativos de los fenómenos fotosensibles presentes en su funcionamiento. Hoy día, los modelos disponibles conviven y se solapan en múltiples técnicas, que la ciencia o el arte utilizan para sus propios fines. Así, los dibujos y grabados, que representan la primera fórmula utilizada por la ciencia para la representación de los fenómenos naturales, siguen vigentes, conviviendo con los actuales medios de producción de imágenes. Recordemos que el período elegido por esta obra es un período de transición, en el que asistimos a un doble proceso: a la consolidación del modelo fotográfico de sales de plata y al surgimiento de la tecnología de la imagen electrónica. La interrelación de estas dos



tecnologías dio lugar a una etapa de convivencia, creadora de múltiples aplicaciones y herramientas que constituyen el tema central de este capítulo.

Existe una razón de peso en todo este proceso, cuyo análisis puede facilitar la comprensión del panorama tan abigarrado que presenta la imagen de nuestros días. Es el hecho, ampliamente reseñado en páginas anteriores, de que las distintas disciplinas o ramas de la ciencia establecidas a lo largo de los siglos, comenzaron a sufrir una serie de delimitaciones y precisiones en cuanto a sus cometidos y conceptos, a raíz del avance experimentado en el electromagnetismo como nueva rama fundamental de la física. El hecho de que la óptica pasara a convertirse en una parte más de esta nueva disciplina a partir de los trabajos de Maxwell, o que la propia química comenzara a ser contemplada dentro de la física, motivado por el grado de conocimiento adquirido con los estudios a nivel atómico, han sido factores que han condicionado el curso de la ciencia y de cada una de las tecnologías de la imagen. De hecho, la interpretación de los fenómenos fotográficos, tales como la formación de la imagen latente, del revelado, o del comportamiento de los materiales fotosensibles, ha sufrido continuas modificaciones a medida que el conocimiento de la estructura de la materia y de los procesos energéticos a nivel atómico, ha ido perfilándose y engrandeciendo. De esta manera, se ha pasado de concepciones estrechamente ligadas a la química tradicional a otras asociadas a la mecánica cuántica y a la teoría de la información. Esta última, a su vez, está altamente condicionada por el desarrollo de los principios y leyes fundamentales que rigen el mundo electrónico en todas sus manifestaciones: desde los procesos internos de los materiales al procesamiento de las señales electromagnéticas. Las fronteras de los procesos fotoquímicos y fotoeléctricos se han difuminado, abriendo la puerta a nuevas interpretaciones de la imagen técnica, que irán floreciendo a la par que el avance científico.

### ***5.1.1. Teoría y experiencias de la fotografía de sales de plata***

En páginas anteriores, vimos cómo los primeros principios científicos extraídos de los fenómenos fotográficos, particularmente las leyes de la sensitometría, aparecieron en 1839, pocos años después de la presentación oficial de la fotografía en la Academia de las Ciencias de París. Posteriormente, en 1862, fueron presentados los estudios fotométricos y sensitométricos de Bunsen y Roscoe, que culminaron en la formulación de su *Ley de Reciprocidad* de los materiales fotosensibles. Sin embargo, no fue hasta que los procedimientos fotográficos consiguieron una mayor estabilización con la llegada de las placas de gelatina en seco al bromuro de plata, en la década de los setenta, que los principios fundamentales de los procesos fotográficos no quedaron mejor establecidos. Esta nueva amalgama fotosensible, aplicada a las placas y a los papeles, ahorró a los fotógrafos el esfuerzo y los inconvenientes de procedimientos lentos y de difícil preparación, como la albúmina y el colodión húmedo, dos de las emulsiones más utilizadas por entonces. A su vez, sirvió para fijar las distintas reacciones que el material fotográfico presenta ante la luz, bajo parámetros más controlables y científicos. Los trabajos pormenorizados de Hurter and Driffield<sup>5</sup>, llevados a cabo a partir de 1870, dieron lugar a la publicación de una serie de tablas que mostraban con rigor el comportamiento de este nuevo tipo de amalgama. En 1890, fruto de todo este esfuerzo, se pudieron fijar las leyes de la sensitometría, que relacionan dos parámetros fundamentales del procedimiento fotográfico: la cantidad de luz recibida por las emulsiones y la densidad u opacidad adoptada por las sales de plata presentes en ellas. La representación gráfica de esta relación quedó plasmada en la figura conocida en los medios fotográficos como *curva característica*. Se trata de una progresión logarítmica que queda

representada por una curva ascendente en la que destacan tres fases. Una de inicio, que corre paralela al eje de abscisas y que refleja la escasa respuesta que la emulsión emite ante niveles mínimos de luz. Otra, de ascenso lineal en 45° respecto de las coordenadas, que representa la proporcionalidad directa entre las dos variables en juego, y que es conocida como *gamma*. Y una tercera fase, que vuelve a tomar la figura de valle, debido a que el material fotográfico deja de responder de forma proporcional a los aumentos continuados de luz. Esta fase se conoce como *solarización*. Paradójicamente, esta progresión logarítmica se asemeja al comportamiento natural del aparato visual humano ante la luz, menos sensible a los pequeños cambios ocurridos en los niveles bajos de iluminación, y muy cualificado para discernir variaciones mínimas en la franja de intensidades de la zona de gamma.

Esta relación logarítmica que se establece entre los niveles de iluminación y de opacidad de la emulsión fotográfica es la que determina los valores de exposición que rigen tanto el sistema óptico como el obturador de las cámaras, a través de la apertura de diafragma y la velocidad de obturación, respectivamente. Tanto un sistema como otro, obedecen al principio de aumentar o disminuir con su acción, el paso de la luz hacia la película; no de manera proporcional, sino por un factor de dos; o sea, dejando pasar la luz el doble o la mitad de la unidad superior o inferior, respectivamente. Esta aplicación del método hipotético- deductivo a los procesos fotográficos condujo a una fijación más estricta de las leyes de la sensitometría, e inauguró un modelo de fabricación de materiales y equipos fotográficos, que se mantiene vigente hasta nuestros días. Aquellos fotógrafos artistas y documentales, que se han interesado por las bases científicas de la fotografía han acudido asiduamente a los manuales de Anselm Adams<sup>6</sup>, que recogen este bagaje de la ciencia fotográfica del siglo XIX, exponiéndolo al lector de una forma didáctica y con un sentido eminentemente práctico, a fin de facilitar las labores relativas a la exposición, el revelado y el copiado de la fotografía en blanco y negro. Que duda cabe que el conocimiento científico del comportamiento de las emulsiones ante la luz es de gran ayuda a la hora de *previsualizar*, en el sentido que Minor White ofrece a este término, los resultados que acompañarán a nuestras fotografías; especialmente, a partir del control de los niveles de contraste de negativos y positivos.

Para la determinación de estas leyes que interpretan los procesos fotosensibles de las emulsiones de sales de plata, fue imprescindible conocer en profundidad los elementos constitutivos de estas amalgamas. Cuando se observa al microscopio una emulsión fotográfica convencional de blanco y negro (bromuro de plata en una amalgama de gelatina en seco, mayormente) se observan diminutos cristales de este tipo de sal, repartidos al azar en la superficie gelatinosa. El tamaño de esos cristales determina la mayor o menor sensibilidad de la emulsión ante la luz y el grado de contraste que se obtiene, una vez revelada. Sin embargo, las emulsiones cuentan con otros elementos como el yoduro, en un ligero porcentaje, colorantes sensibilizadores, que permiten la captación de la luz en una amplia gama del espectro, *gérmenes de sensibilidad*, potasio, etc., que hacen difícil articular una interpretación completa e íntegra de todo el proceso fotográfico. En el modelo clásico de producción de imágenes fotográficas por medio químicos, donde se parte de una emulsión sensibilizada que procedemos a exponer a la luz, para seguir con un proceso de revelado que muestra la imagen oculta en la amalgama, y que concluye con un proceso de fijación, es el proceso de formación de la imagen latente, el que ha despertado un mayor interés por parte de los científicos fotógrafos. En torno al cambio de siglo, se produjo una serie de acontecimientos en el seno de la física experimental y teórica, especialmente por la llegada de las teorías cuántica y de la relatividad, que cambiaron drásticamente la perspectiva que se tenía sobre numerosos fenómenos naturales, tanto a escala astronómica como microscópica. El enigma de la formación de la imagen latente en las emulsiones fotográficas no pudo escapar a estas nuevas influencias.

Una segunda etapa, por tanto, en la comprensión del proceso fotográfico vino dada por el intento de explicar los procesos de formación de la imagen latente y del revelado bajo la óptica de la recién aparecida teoría cuántica y de otros avances científicos, como fue la interpretación de Einstein del fenómeno fotoeléctrico. A estas dos grandes contribuciones de la ciencia del siglo XX, hay que sumar el gran empuje recibido por el estudio de la estructura atómica de los cristales, gracias a la puesta en práctica de la técnica de la espectroscopía por difracción de rayos X (ver Cap. 3.6.). Si partimos del hecho de que gran parte de los materiales presentes en la naturaleza son cristales, podemos comprender la gran trascendencia que tuvo esta técnica a la hora de interpretar muchos procesos físico-químicos, como moléculas, proteínas, o las propias emulsiones fotográficas. Todos estos avances ocurridos en las ciencias experimentales, forzaron una nueva interpretación del proceso de formación de la imagen latente. La recién instaurada ciencia de la fotoelectricidad se sumó a este esfuerzo, tras ser aplicada con notable éxito en numerosas tecnologías, como la televisión, la radiocomunicación, o la microscopía electrónica. Fotones y electrones, los nuevos entes subatómicos claramente identificados en los fenómenos fotovoltáicos, de fotoconductividad y fotoeléctrico, fueron rescatados también para dar buena cuenta de lo que ocurría en el proceso de formación de la imagen latente. Son años, y hablamos de las primeras décadas del siglo XX, en los que los fundamentos teóricos de las dos tecnologías de la imagen presentes hasta entonces: la fotografía convencional, de carácter fotoquímico, y la incipiente imagen electrónica, convergieron, al tiempo que generaban instrumentos y aplicaciones conjuntas en los laboratorios. Las sales de plata empezaron a estudiarse desde la perspectiva de estos nuevos hechos; como estructuras cristalinas en las que el trasiego de electrones de una sustancia a otra, por efecto de la luz, se produce a escala cuántica, en saltos. Hasta mediados de siglo, se sucedieron una serie de teorías que intentaron explicar el proceso de formación de la imagen latente por esta vía, como la *teoría del subhaluro* de Carey Lea, la de la *polimerización* o cambio de estado del haluro, suscrita por los mismos Hurter y Driffield, o la de *descarga superficial* de electrones hacia el interior de los granos, formulada por Schwarz<sup>8</sup>. Todas ellas intentaron ofrecer una explicación integral del proceso de *reducción* de las sales de plata en plata metálica, proceso químico que se encuentra en la base del fenómeno fotográfico. No obstante, la comprensión de esta reacción química por efecto de la luz, sigue siendo una asignatura pendiente, a pesar de las múltiples hipótesis que se han barajado a lo largo de los años. Entre ellas, hay que destacar las que abogaron por la existencia de determinados *gérmenes de sensibilidad* en las emulsiones, o *motas de impureza*<sup>9</sup>, o *centros de revelado*, coincidiendo todas ellas en defender que es la existencia de una serie de sustancias, tales como el sulfuro de plata, presentes en el interior de los granos de haluro de plata, lo determinante en la formación de la imagen latente.

Sin embargo, hubo que esperar a la teoría cuántica con su nueva concepción del universo atómico, y a la nueva teoría dual de la luz y la materia, para ver surgir interpretaciones más fecundas sobre el fenómeno fotográfico, especialmente sobre sus propiedades fotosensibles y sobre el proceso de la formación de la imagen latente. Entre ellas, la que más aceptación tuvo durante décadas fue la de R. W. Gurney y N. F. Mott<sup>10</sup>. Esta teoría hizo especial hincapié en los nuevos conceptos provenientes de la fotoelectricidad, que de alguna forma se encontraban en el ambiente de los laboratorios y había entrado a formar parte del lenguaje de los científicos experimentales dedicados al estudio de las emulsiones fotográficas.

*Se sabe desde hace tiempo que las sales de plata poseen las propiedades fotoeléctrica y fotoconductora. Por la primera, se sabe que las sales de plata liberan electrones por acción de la luz, y por la segunda, que la liberación interna de electrones redundará en un*

*cambio de la conductibilidad en la iluminación ( a veces llamado efecto fotoeléctrico interno). Cabría la posibilidad, por tanto, de que el mecanismo responsable de uno de estos efectos pudiera ser identificado con aquel que se produce en la formación de la imagen fotográfica latente; es por lo que emprendimos hace dos años experimentos encaminados a investigar los dos efectos en relación con las sales de plata, y en especial con el bromuro de plata.<sup>11</sup>*

La *eficiencia cuántica* fue un concepto que comenzó a substituir el hasta entonces más conocido de sensibilidad de los materiales, entendiéndose por ella, la relación existente entre la cantidad de luz recibida por una superficie metálica y la respuesta de ésta en términos de emisión de electrones, tal como era comprendido el efecto fotoeléctrico. En el caso de la fotografía, la eficiencia cuántica hace mención a la cantidad de plata metálica producida por acción de la luz; aproximadamente un átomo de plata por cada *cuanto de luz* absorbido, a temperatura ambiente. También la fotoconductividad, o capacidad de los metales de cambiar su nivel de conducción o de resistencia eléctrica por acción de la luz, se traspasó a los dominios de las sales de plata. La hipótesis de Gurney y Mott se apoya principalmente en este efecto, al defender que los *gérmenes* o *partículas sensibilizadores* (sulfuro de plata u otros), detectados por el microscopio electrónico en los granos de las sales de plata, reciben la acción de electrones liberados en los cristales una vez que son expuestos a la luz. Gracias a este fenómeno, los gérmenes se cargan negativamente, atrayendo los iones de plata repartidos por el cristal y formando átomos de plata. En otras palabras, actúan a modo de trampas interpuestas a los electrones que circulan por la banda de conducción del metal. Esta hipótesis se comprobó experimentalmente, al exponerse distintos tipos de película fotográfica a intervalos de tiempo cortos, y acto seguido a diferentes temperaturas. Las dos fases intermitentes en el proceso fotográfico: movilidad de los electrones por efecto de la luz y formación de la plata por neutralización de los gérmenes, se comprobaron mediante este tipo de experiencias. Además, la hipótesis proporcionó explicaciones muy plausibles de otros fenómenos fotográficos muy conocidos por entonces, como la *ley de reciprocidad*, o falta de proporcionalidad entre la densidad adoptada por una emulsión y la intensidad de luz recibida; el efecto Herschel, o efecto negativo de la luz roja en las placas expuestas; o el de la sensibilización de emulsiones por medio de tintes para la mejora de la respuesta espectral del material fotográfico.

El siguiente paso en la interpretación científica de los fenómenos fotográficos vino de la mano de J. W. Mitchell<sup>12</sup> a principios de los cincuenta. Este autor se propuso explicar algunas lagunas existentes en la teoría de Gurney- Mott; porque el proceso de formación de la imagen latente parecía contener interacciones de electrones y de iones más complejas de lo que esta teoría propuso; y la estructura cristalina, las impurezas, o el tipo de superficie que forman las sales son factores que se resistían a una explicación tan simplificada de los hechos. Mitchell observó que las imperfecciones y dislocaciones detectadas en las estructuras de los cristales en general, era una característica compartida por los cristales de sales de plata, siendo a su vez un factor determinante en la sensibilidad de la amalgama fotográfica. Además, detectó una relación muy estrecha entre los agentes sensibilizadores de las emulsiones, tintes mayormente, las partículas de plata y los halógenos liberados en la exposición. El estudio retrospectivo que este autor llevó a cabo sobre determinadas investigaciones realizadas en el pasado, fue decisivo en la formulación de su nueva concepción del fenómeno fotográfico.

Existen otras contribuciones, teóricas y experimentales muy importantes en el desarrollo de la ciencia fotográfica. La fotografía se ha construido, como el resto de las disciplinas científicas, con la aportación de cientos y cientos de esfuerzos



individuales, y el trabajo en grupo en laboratorios, hecho que nos aparta de cualquier visión unilateral a la hora de comprender el proceso de edificación de esta joven ciencia. Por citar algunas de las contribuciones más sobresalientes en este campo, encontramos, la *teoría de la reproducción de los tonos*, de L. A. Jones; la *teoría de la granularidad*, de E. Selwyn, que relaciona la densidad con el tipo de grano presente en las emulsiones; los diferentes estudios hechos en torno a la formación del color; los avances conseguidos por la obra de Eder, Vögel y Sheppard en el estudio de la *sensibilización espectral* por medio de tintes, especialidad que abrió las puertas a la fabricación de emulsiones pancromáticas y especializadas en determinadas franjas del espectro; el análisis de la *imagen revelada*, llevada a cabo por numerosos investigadores; la comprensión del proceso de revelado en términos electroquímicos por Lermontoff y Armstrong, la teoría cuántica de la *exposición fotográfica* de Siberstein, entendida en términos de probabilidad relativa al impacto de los fotones<sup>13</sup>, hasta llegar a las nuevas contribuciones hechas en el seno de la informática y la electrónica, que han abierto un nuevo paradigma en el campo de la investigación fotográfica.

Con la llegada de la Teoría de la Información, se abrió una tercera etapa en la interpretación del proceso de formación de la imagen fotográfica, tanto de sales de plata como electrónica. La tesis presentada por Claude E. Shannon en 1948, fundamentada en su teoría matemática de la comunicación, fue la piedra angular sobre la que se edificó esta nueva fase. El análisis de la información desde un punto de vista puramente cuantitativo, probabilístico, se abrió al campo de aplicación de la tecnología desarrollada en la época, preferentemente en el ámbito de las telecomunicaciones: televisión, telefonía y codificación- encriptación de mensajes de carácter estratégico- militar. La imagen pasó a ser comprendida en términos de señales de una determinada riqueza de frecuencias en la que los niveles de luminancia o brillo de los múltiples puntos o píxeles que la conforman, son decisivos a la hora de obtener una determinada resolución, o nivel de discriminación de los detalles presentes en la escena original. En la formación de este nuevo paradigma, los trabajos de autores como Otto Schade, aplicando los conceptos desarrollados en el seno de la ingeniería electrónica y de la teoría del procesamiento de señales a la formación de imágenes; u otros tantos científicos, que se apoyaron en los ordenadores para llevar a cabo la simulación de los procesos electrónicos e iónicos con el fin de facilitar la comprensión del fenómeno de la sensibilidad fotográfica, han sido de gran importancia<sup>14</sup>. El conjunto de estas interpretaciones ha sabido conjugar magistralmente las aportaciones recibidas por teorías que se remontan a la termodinámica y a la cuántica, sin olvidar la obra fundamental de Jean Baptiste Joseph Fourier (1768- 1830) sobre la conducción del calor. Su principio general, comentado en páginas anteriores, de que cualquier señal compuesta, por muy compleja que sea, puede ser representada por una serie de ondas simples, cada una de una frecuencia determinada, es de gran utilidad en todas aquellas ramas de la tecnología dedicadas al procesamiento de señales, como es el caso de la imagen electrónica. Entender el conjunto de señales, relativas al calor, al sonido o a la imagen, como un conjunto de ondas sinusoidales con frecuencias comprendidas en un determinado ancho de banda, ha sido la gran aportación de este ilustre matemático.

El amplio abanico de posibilidades que ofrece en la actualidad la imagen tecnológica encuentra de alguna forma puntos de conexión e interpretaciones comunes en estas ramas de la ciencia dedicadas tanto al procesamiento de la información como al estudio de la estructura de la materia. Las perspectivas ofrecidas por la teoría cuántica y de la información, ofrecen explicaciones complementarias del proceso de formación de imágenes; en una escala atómica, por la interacción que existe entre fotones y electrones presentes en las fuentes de radiación y en los materiales fotosensibles; y por su procesamiento, debido a que los conceptos de ruido, entropía, o eficiencia cuántica, relativas a las señales, son

determinantes. En la actualidad, los conceptos y la terminología provenientes de la teoría del procesamiento de señales, nacida fundamentalmente en el campo de la electrónica, la ingeniería eléctrica, la informática y las telecomunicaciones, ha afectado de lleno la interpretación que damos a los fenómenos de adquisición y producción de imágenes, incluidos los fotográficos convencionales. La resolución de las imágenes, ya sean fotográficas, de vídeo, o de escáner, tanto analógicas como digitales, es un concepto con amplias ramificaciones, que es unificado en la actualidad por la teoría de la información. El modelo teórico más citado en este contexto es el de Shannon y Nyquist<sup>15</sup>, que relaciona resolución con grado de muestreo y con frecuencia espacial, entendida esta última como la variabilidad existente en los diferentes tonos de grises ( o de luminancia) presentes en la escena real, en relación con la capacidad de reproducción de los mismos, que tiene el sistema fotográfico (a nivel óptico y de sensor). Ancho de banda, modulación, codificación, función de transferencia, resolución temporal y espacial, o impulso, son términos provenientes de la ingeniería dedicada al diseño y control de circuitos eléctricos, que han terminado por invadir el campo de la imagen tecnológica de nuestros días.

### ***5.1.2. Nuevos mundos, nuevas imágenes***

A partir del desarrollo de la física del estado sólido, el control sobre los procesos eléctricos ha conseguido cotas mayores, dando lugar a nuevas técnicas de generación de imágenes de carácter fotoeléctrico, con una gran aplicación, por ejemplo, en la reprografía y en la transmisión de imágenes a distancia. La electrofotografía comenzó a aparecer con entidad propia a partir de los años posteriores a la II gran guerra, constituyéndose como una verdadera precursora de lo que sería la futura imagen electrónica fotográfica tanto analógica como digital. En el capítulo de técnicas no convencionales de producción de imágenes estudiaremos las más representativas. (Cap 5.4)

Esta masiva proliferación de sistemas e instrumentación de adquisición de imágenes ha hecho necesaria una nueva formulación del proceso de producción de las mismas. Si seguimos el esquema sugerido en este contexto por Robillard<sup>16</sup>, encontramos las siguientes fases:



***Cuadro nº 4. Proceso de formación de imágenes fotográficas. Jean. Robillard. 1964.***

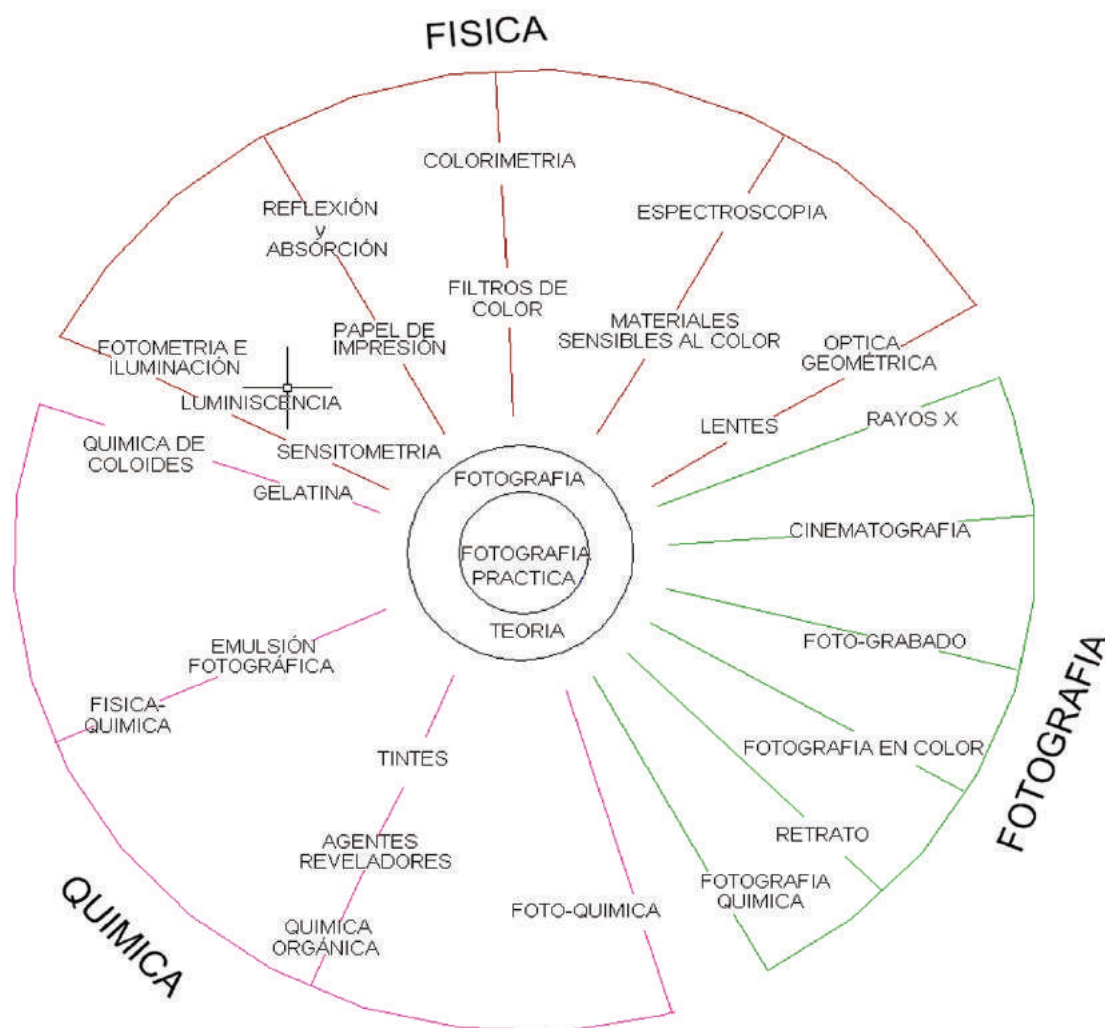
Este criterio generalizador, nos obliga a incluir multitud de procedimientos y medios técnicos en cada uno de estos apartados. Los fenómenos fotosensitivos, por ejemplo, pueden dar cabida a procesos de fotolisis, fotoconductividad, fotopolimerización, etc. En el caso de la fotografía de sales de plata, se trata de un proceso de fotolisis, ya que es la luz la que produce un cambio o descomposición química (reducción) en la emulsión. En el siguiente nivel, o de amplificación, observamos que para hacer visible la imagen latente, es necesario que cierta energía sea incorporada al material fotosensible. En el caso de la fotografía, esta energía es de carácter químico, la plata queda reducida por la acción del revelador;

por el contrario, en otros sistemas, esta energía puede ser de tipo eléctrico, como en la xerografía o en el fax, donde se da un desplazamiento mecánico de las partículas cargadas bajo la acción un campo electrostático. En otros casos, la fuente de energía podría estar incluida en la propia emulsión, como en la fotopolimerización o en la autorradiografía, donde se da una reacción de tipo nuclear o en cadena. Desde otra perspectiva, observamos cómo en este tercer nivel, podemos contar con la doble posibilidad de que sean procesos químicos (oxidación, reducción, disociación, síntesis) u ópticos (absorción, birrefringencia, dicroísmo, reflexión y dispersión). Si en la fotografía es la reducción de las sales la que proporciona la formación de la imagen, en la xerografía es un proceso de reflexión. Por último, la fase de fijado puede ser también química, como en la fotografía convencional, o térmica, electromagnética o electrónica, como es el caso de la xerografía o del fax. La combinación perfecta persiguiría obviamente formas de producción de imagen rápidas, muy sensibles y que pudieran llevarse a cabo a la luz del día, de una forma práctica y simple; lo óptimo, por tanto, sería la combinación de procesos mixtos, en los que la luz y la electricidad pudieran actuar de foma conjunta, en perfecta simbiosis.

*Por ejemplo, el material sensible, ya sea papel o película, podría ser manipulado a la luz del día, porque no sería sensible a la luz a no ser que estuviera en presencia de un campo eléctrico o de cualquier otro proceso físico. Asimismo, no habría necesidad de un disparador mecánico en la cámara ya que esta acción sería llevada a cabo por un procedimiento similar. Con el uso de un campo eléctrico, el tiempo de exposición vendría dado por la "longitud de impulso". Incluso se podría mejorar la situación, si este proceso pudiera incorporar también la energía necesaria para el revelado o amplificado. Desde luego, esto es una idealización y el proceso ideal tal como lo describimos puede que nunca se llegue a conseguir.*<sup>17</sup>

Estas palabras emitidas en 1964, son bien ilustrativas de las aspiraciones que el conjunto de la ciencia tenía respecto de una tecnología que no tardó en aparecer. La llegada de los sensores de estado sólido, especialmente de los CCD, cumplió con creces estos deseos. Hoy día, los conceptos de velocidad, contraste, gamma, resolución y sensibilidad, que nos han guiado durante tanto tiempo en la práctica fotográfica, y que provienen de la forma en que valoramos y clasificamos las emulsiones fotográficas, se ven reemplazados y reinterpretados por los de eficiencia cuántica, relación señal/ruido, nivel de muestreo, o ancho de banda, que son conceptos nacidos en el seno de la tecnología de la imagen electrónica en los años que vieron aparecer la televisión, el osciloscopio o las primeras células fotoeléctricas. En la traslación de estos conceptos de un campo a otro, encontramos que la fotografía tendría una eficiencia cuántica muy alta si la comparamos con el resto de tecnologías de la imagen, a excepción de la nueva tecnología digital, que se acerca a pasos agigantados a este nivel de rendimiento.

Para comprender el proceso de cambio tan extraordinario que ha experimentado la fotografía y la imagen tecnológica en su conjunto a lo largo del siglo pasado, basta atender a los siguientes esquemas que sintetizan los distintos estamentos científico- técnicos presentes en el organigrama empresarial de una de las compañías más emblemáticas de este sector: la Eastman Kodak, dedicada desde finales del siglo XIX a la fabricación e investigación de productos fotográficos. El primer esquema fue elaborado por Keneth Mees en 1918, tras ser reclutado por esta empresa para dirigir los proyectos de investigación en fotografía<sup>18</sup>. El segundo es de elaboración propia, a partir de la página web de esta



*Cuadro n° 5. Organigrama de Eastman Kodak, 1918. Según Keneth Mees*

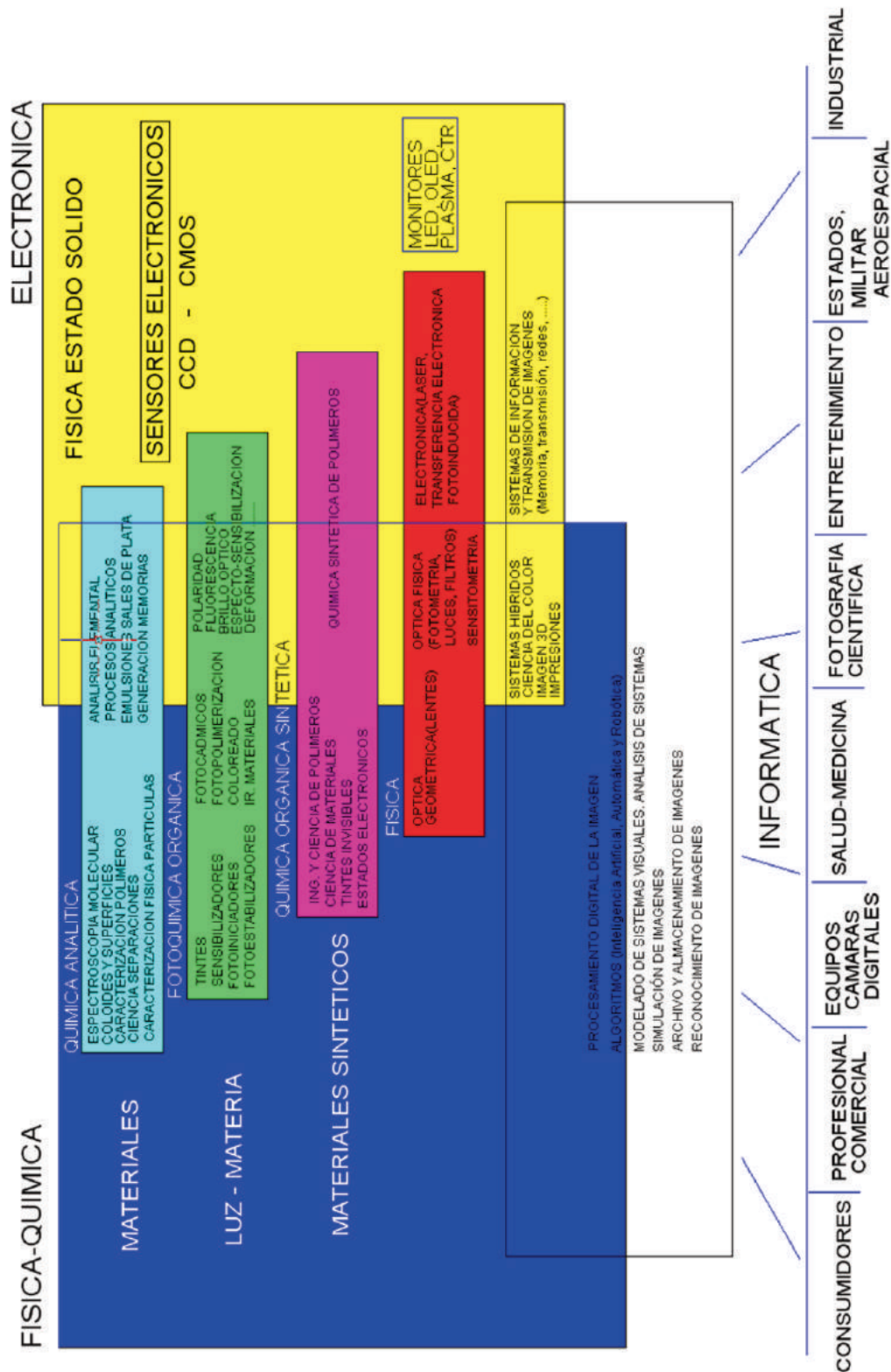
empresa, tal como aparecía expuesta en noviembre de 2004. El contraste entre las dimensiones de uno y otro es altamente ilustrativo del proceso de transformación que ha experimentado el conjunto de la imagen tecnológica, y de su fuerte presencia en la sociedad de nuestros días. Elementos a destacar en el estado actual de esta tecnología son: el papel destacado de la ciencia de los polímeros, la presencia de las tecnologías de la información, con sus apartados relativos a robótica, inteligencia artificial, impresiones, retoques, simulación, o reconocimiento de imágenes; el conjunto de la nueva tecnología electrónica (sensores, cámaras, escáneres, etc.), y los apartados pertenecientes a la química orgánica y analítica, que han sufrido una expansión y especialización considerables. (Cuadros n° 5 y 6.)

## 5.2. La fotometría por medios electrónicos

La interpretación dada por Einstein del fenómeno fotoeléctrico supuso un punto de inflexión en la historia de la ciencia, pues proporcionó un fuerte espaldarazo a la recién aparecida teoría cuántica, defendiendo la existencia de unidades mínimas de luz denominadas fotones, entendidos como cuantos de luz. La física se vio obligada a buscar un punto de compromiso entre las interpretaciones ofrecidas por las teorías clásicas acerca del mundo físico, ligadas a los fenómenos macroscópicos, y esta nueva visión del mundo, resultado de la observación y



# KODAK 2003



Cuadro n° 6. Organigrama de la compañía Eastman Kodak, 2003. (Elaboración propia.)

análisis del universo atómico. A un mismo tiempo, ayudó a la consolidación de la nueva teoría sobre la luz y de la ciencia fotoeléctrica, íntimamente relacionada con la materia de este capítulo: la fotometría por medios electrónicos (Ver cap. 3.1.y 3.9.). Einstein afirmó, en líneas generales, que ciertos materiales, normalmente metales, presentan un umbral determinado, o *umbral-frecuencia*, que es necesario superar a fin de poder liberar electrones; y que éste depende exclusivamente de la frecuencia de la luz incidente. La intensidad de la luz afecta exclusivamente al número de electrones despedidos, mientras que la energía de la luz necesaria para ello, depende de su color o frecuencia. También afirmó que el trabajo necesario para despojar un electrón de un cuerpo está sujeto al valor de esta frecuencia y a la constante de Planck. Esta contribución de Einstein cerró una etapa en la investigación científica, cuyo punto de partida estuvo en la identificación del fenómeno fotoeléctrico a cargo de H. Hertz en 1887, y en las importantes contribuciones a este mismo asunto, de Halwachs, Elster y Geitel, tan próximas a los estudios fotométricos. Recordemos que las primeras propuestas de utilizar células fotoeléctricas para fines fotométricos fueron sugeridas por el propio Hallwachs al descubrir que el óxido de cobre presenta una actividad fotoeléctrica de gran durabilidad en el tiempo<sup>19</sup>. Este hecho le sirvió para medir la radiación de una lámpara de arco. También Elster y Geitel hicieron mediciones de las radiaciones ultravioletas del sol con una esfera de zinc conectada a un electroscoipo. Ya vimos cómo en 1912, construyeron un fotómetro fotoeléctrico en forma de pistola, montado a semejanza de un teodolito, puesto a prueba en la medición del eclipse de ese año. Posteriormente, discípulos de estos autores hicieron mediciones fotométricas de la luz solar por dispositivos fotoeléctricos emplazados en globos.

Las células fotoeléctricas quedaron, por tanto, divididas de acuerdo con el procedimiento empleado en su construcción. En unas, el metal fotosensible era destilado en un baño de plata, que había sido depositado previamente en las paredes de la célula o tubo; en otras, era destilado sobre una placa de metal en el interior del mismo. En ambas fórmulas podía darse la opción de que el tubo estuviera preparado al vacío, o que contuviera un gas inerte en su interior. En el primer modelo, los electrones se desprenden sin más por la acción de la luz sobre la superficie sensibilizada, mientras que en los segundos, la corriente es amplificada dentro del tubo al producirse un campo eléctrico lo suficientemente intenso como para originar un proceso de ionización por colisión. La extremada sensibilidad de las células fotoeléctricas y su respuesta discriminada a diferentes longitudes de onda las convirtieron en un instrumento muy apreciado en los laboratorios y en la industria del momento.

A un mismo tiempo, las investigaciones en torno a las propiedades del selenio siguieron su curso. Mientras que el selenio, en su forma vítrea, no es conductor, sí lo es en su forma cristalina o granular, dependiendo esta conductividad de la forma de incidir la luz, y de su temperatura. En este caso, es siempre favorecida por el color amarillo y rojo, y en menor medida por el infrarrojo. El selenio, aplicado a uno de los electrodos de una célula o tubo fotoeléctrico, dio lugar a fotómetros de altas prestaciones. A finales del XIX, comenzó a ser utilizado en la medición de las intensidades lumínicas de las estrellas, tal como señalamos en capítulos anteriores (Ver cap. 4.2.). Estudios fotométricos hechos por Fournier d'Albe y por Elster y Geitel en la segunda década del siglo XX, demostraron que las células fotoeléctricas de selenio eran mucho más sensibles que las de potasio. Aunque no tardaron en aparecer sus primeros detractores. W. W. Coblentz presentó en 1918, serias objeciones a su uso, argumentando la excesiva dependencia de su sensibilidad respecto de las variaciones de temperatura y color de la luz, o su lenta recuperación a un estado normal de resistividad, después de haber sido expuesto a la luz. Así, confirmó que esta *inercia* dependía en gran medida de la intensidad de la luz recibida y de las condiciones lumínicas, siendo muy lenta en la oscuridad.

Hacia finales de los años veinte, los dispositivos fotoeléctricos de medición de la luz, comunmente llamados células fotoeléctricas, o simplemente fotocélulas, quedaron prácticamente reducidos a dos fórmulas básicas: los fototubos (ver Figura 4.11.) y las células de selenio (ver Figura 4.25).<sup>20</sup> En cuestión de pocos años, los métodos fotométricos visuales y fotográficos comenzaron a ser desplazados por esta nueva instrumentación que, a pesar de encontrarse en una fase de desarrollo, ofreció niveles de fiabilidad y precisión mayores. Su respuesta a la luz es prácticamente lineal y no presentan efectos de fatiga, siempre que las condiciones ambientales, de mantenimiento y de suministro energético sean las adecuadas. Los fototubos, en particular, no tardaron en experimentar una serie de mejoras considerables en cuanto a su sensibilidad y respuesta espectral. Al estar ambas propiedades fundamentadas en el efecto fotoeléctrico producido en el metal depositado en el cátodo, pudieron ser aplicados fácilmente a múltiples tratamientos sensibilizadores de la superficie del mismo. La construcción de los fototubos respondía a un esquema básico, consistente en un tubo de vacío en el que el ánodo estaba formado por una rejilla o un bucle de alambre, normalmente de níquel o platino; y el cátodo, por una superficie sensible de un metal, normalmente de cesio, potasio o rubidio, y adherida a las paredes del tubo. Es en esta superficie donde se produce el efecto de desprendimiento de electrones por acción de la luz. Una variante de este tubo sustituyó el vacío por un gas inerte en su interior, normalmente argón. Esta fórmula presentó la ventaja de poder generar y soportar un mayor voltaje. Sin embargo, pronto se optó por mejorar la fotosensibilidad de los fototubos, sin necesidad de introducir gases de este tipo, mediante el efecto de la *emisión secundaria* de electrones (ver Cap.4.5.). Este procedimiento dio lugar al *fototubo multiplicador*, estudiado en el capítulo 4.5., un dispositivo que superó notablemente la sensibilidad de cualquier fotocélula normal, incluso de aquellas que eran asociadas a amplificadores. Con el tiempo, se convirtió en una de las herramientas más útiles en el campo de la fotodetección y de la fotometría, por su capacidad de captación de intensidades luminícas mínimas. (ver Cap. 4.2.) ( ver Figura 4.12).

Las células fotoeléctricas también sirvieron para superar una etapa en la que la discriminación visual humana había jugado un papel muy importante en la ciencia fotométrica. Pronto quedó de manifiesto la superioridad de los métodos electrónicos sobre los visuales en aspectos como la rapidez y mayor precisión en las mediciones, por su capacidad de registros continuos en el tiempo, y principalmente por estar libres de la fluctuabilidad o acomodación propias del sistema visual y sensorial humano, tal como pone de manifiesto, por ejemplo, en el efecto Purkinje<sup>21</sup>. Es importante resaltar en este sentido que la fotometría, hasta fechas muy recientes, ha sido construida mayormente sobre la *visión fotópica*, dependiente de los conos de nuestro sistema óptico. El concepto de *luz visible* hace mención a este tipo de visión, que goza de una gran resolución de colores cuando se dan condiciones de iluminación óptimas. Por el contrario, la *visión escotópica*, regulada en mayor medida por los bastones, pertenece a niveles de iluminación bajos, una vez que el ojo se ha acomodado a esa *oscuridad*, situación en la que este órgano posee niveles de resolución altos para luces monocromáticas o para objetos en movimiento<sup>22</sup>. Si el pico de mayor sensibilidad para la visión fotópica se sitúa en el color verde- amarillo del espectro, para la visión escotópica se produce un desplazamiento hacia la zona del color azul. El hecho de que la ciencia de la luz, a lo largo de la historia, haya ido expandiendo su foco de interés desde el espectro visible al resto de zonas del espectro electromagnético, ha contribuido en gran medida a expandir el concepto de fotometría al de radiometría, y a terminar con siglos de prevalencia del ojo humano como principal instrumento de captación y discriminación lumínica, en beneficio de los medios artificiales, tales como los fotográficos o los fotoeléctricos.

En cuanto a las diferencias que existen entre estos dos últimos métodos fotométricos: electrónicos y fotográficos, es importante señalar que mientras los primeros se caracterizan por el conjunto de cualidades arriba enumeradas; los segundos se apoyaban en el principio fotométrico básico, que afirma que dos fuentes lumínicas serán de igual valor, si sus efectos sobre la emulsión son idénticos. Esto obligaba a llevar a cabo un control exhaustivo de todo el proceso fotográfico, desde el material de partida, tanto óptico como relativo a la emulsión fotosensible, a los niveles de exposición, técnicas de revelado, medición de densidades, etc., teniendo en cuenta además variables como la temperatura, humedad, o la acidez del agua. A la postre, la fotometría fotográfica descansaba sustancialmente en el análisis fotomicrográfico de las emulsiones; esto es, en el estudio de los niveles de opacidad o densidad de la amalgama y de la distribución y cantidad de granos de plata que son afectados por la luz. Estos requisitos la condenaban en gran medida a supeditar su fiabilidad a criterios estadísticos.<sup>23</sup> La *curva característica* de los materiales fotográficos fue, por consiguiente, el utensilio que hizo posible la fotometría fotográfica, puesto que con ella se consiguió, hasta cierto punto, la fijación de los diversos parámetros y variables que participan en el complejo proceso fotográfico (tipo de emulsión, intensidad y frecuencia de la luz, métodos de exposición, temperatura, formas de revelado, etc.). Estos son factores que debían ser rigurosamente controlados para evitar que se sumaran otras limitaciones consustanciales al método fotográfico, como el *efecto Schwarzschild*, que contradice la ley de reciprocidad; el efecto *halo*, el *efecto Eberhard*, relativo a los niveles altos de densidad, la fluctuación de la sensibilidad ante los cambios de intensidad de la luz, o la sensibilidad desigual de las emulsiones dependiendo de su grosor.

Estas características del proceso fotográfico hicieron que la fotometría buscara con cierta premura el apoyo de la instrumentación fotoeléctrica, abriéndose un periodo de transición que duraría décadas. Fueron numerosas las firmas comerciales dispuestas a satisfacer la demanda de un mercado floreciente. Los fotómetros puramente fotográficos, como el de tubo, o el de Hartmann, que utilizaba un cubo de Lummer- Brodhun, fueron sustituidos rápidamente por nuevas versiones de los mismos, como el *Askania- Werke*, que incorporó en su diseño células fotoeléctricas. También, aquellos que utilizaban normalmente diafragmas de iris para la fotomedición estelar, buscaron apoyo en los fotomultiplicadores, dando lugar, por ejemplo, al Sartorius A. G, una versión moderna de los mismos. El *microfotómetro autograbador de Zeiss*, tuvo también gran aceptación al incorporar un electrómetro que permitía hacer mediciones fotométricas, directamente y de forma automática, desde la placa fotográfica (ver Figura 4.16). Versiones posteriores del microfotómetro generaban los resultados por medios electrográficos de grabación con pluma. En espectrografía, las fotocélulas fueron incorporadas rápidamente, dada su capacidad para medir con gran precisión las relaciones existentes entre las diferentes longitudes de onda registradas, dando lugar al de Koch y Goos, y el *Askania- Werke*, que contaban con electrómetros; o el de Moll, que incorporó una termocélula y presentaba los resultados espectrofotométricos en forma de gráfico junto a una copia de la fotografía original. Hilger y Watts fabricaron también un microfotómetro de aplicación en espectroscopía, que empleaba un fotomultiplicador y un dispositivo de grabación a pluma parecido al de Zeiss.

La dinámica general dentro de la fotometría fotográfica en este periodo de entreguerras, fue la de una sustitución continuada de los procedimientos exclusivamente fotográficos por sistemas fotoeléctricos, más fáciles y rápidos en su manejo, especialmente en los ámbitos de la espectrografía y de la fotometría estelar, donde las mediciones requerían una gran minuciosidad. Uno de los más aceptados en astronomía, debido a su eficiente automatismo, fue el Minnaert-Houtgast. Fue utilizado con notable éxito en la elaboración del *Atlas Fotométrico*



de *Utrecht*, relativo al espectro solar, proporcionando gran cantidad de datos sobre las posiciones, intensidades y formas de miles de líneas espectrales. El *Autografo* de Moseley fue un instrumento fotométrico muy utilizado también en observatorios astronómicos, concretamente para el registro directo de las intensidades lumínicas, gráficamente representadas por medios electromecánicos, al modo de una *curva característica*. El uso de tubos de rayos catódicos y de las primeras versiones de escáneres electrónicos, proliferó también en esta época, para la reproducción automática de los niveles de intensidad que proporcionaban las imágenes fotográficas directas, o las procedentes del registro de pantallas fluorescentes. La tendencia a que fueran las propias máquinas las que hicieran las mediciones, el cómputo y el trazado de las curvas era algo más que manifiesto. A pesar de la lentitud que presentaban los primeros grabadores electrónicos, como el *Speedomax*, que se demoraba horas en ofrecer la información, los científicos los preferían por su relativo automatismo y por su adaptabilidad a los primeros ordenadores.

Para finales de la década de los cuarenta, los fotómetros contruidos con fotocélulas eran mayoritariamente requeridos por los observatorios y los laboratorios científicos e industriales, entre otras razones, por su mayor fiabilidad, mayor sensibilidad, linealidad en su respuesta a los estímulos luminosos, una medición de las diferencias espectrales más acusada, y por la flexibilidad que proporcionaba poder ser amplificadas sus señales. En favor de la fotometría fotográfica, hay que señalar que, mientras que los medios fotoeléctricos sólo pueden hacer mediciones puntuales, las placas son capaces de recoger en una simple exposición miles de puntos de información, que pueden ser analizados posteriormente en detalle. En el caso de la fotografía astronómica, por ejemplo, un simple fragmento de una placa o un fotograma de película puede contener miles de estrellas, que quedarán fijas indefinidamente para el estudio de sus posiciones e intensidades. Lo mismo ocurre en espectrografía, donde cientos de líneas espectrales pueden ser registradas permanentemente. La metodología iniciada por Pickering en 1910, consistente en medir fotométricamente el reverso de las placas de los objetos celestes, experimentó un gran avance gracias a la incorporación de dispositivos electrónicos. En un principio se añadieron diafragmas regulables que permitieron la fijación de los diámetros de los objetos y el control del paso de la luz de una forma concentrada hacia una termopila o un galvanómetro, encargados de leer las intensidades. Tal fue el caso de los dispositivos de Harlan Stetson y Jan Schilt, utilizados en numerosos observatorios europeos hasta que comenzaron a utilizarse las células fotoeléctricas, fotomultiplicadores, y tubos de rayos catódicos para los mismo fines. En la década de los sesenta, la automatización de estas operaciones se vio ampliamente facilitada por la llegada de los primeros ordenadores y de los escáneres electrónicos, que fueron aplicados a la lectura y procesamiento de la información contenida en las placas fotográficas.

*Un instrumento ideal para el futuro sería un dispositivo que combinara la enorme capacidad de almacenamiento de la emulsión fotográfica con la eficiencia, linealidad y flexibilidad de los procesos foto- eléctricos. Posiblemente tal instrumento sea desarrollado en un futuro próximo a partir de las técnicas de la televisión y de los tubos de memoria.*<sup>24</sup>

Estas pretensiones no fueron muy descabelladas, si tenemos en cuenta que tan sólo dos décadas más tarde hizo acto de aparición la tecnología de sensores de estado sólido. La fase de solapamiento de las tecnologías fotográficas y fotoeléctricas llamaría a su fin con la aparición del procesamiento digital de la imagen. Pero antes de que esto sucediera, los dispositivos fotoeléctricos fueron

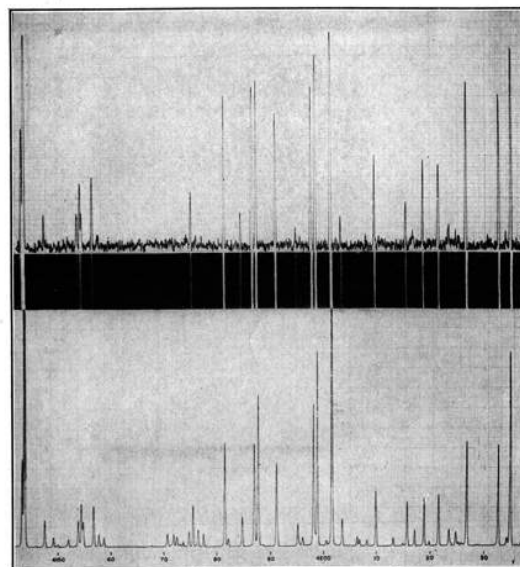
ampliamente investigados y aplicados en fotometría. En el caso de las células fotoeléctricas, basadas en el efecto de la fotoconducción, y normalmente construidas con selenio, encontramos un modo de actuar diferente a la de fototubos. Aquí no hay necesidad de generar una corriente mediante ningún dispositivo eléctrico, como una batería, porque ésta se genera por una conversión directa de la energía lumínica en eléctrica. La célula fotoconductoras consiste básicamente en una pieza de metal recubierta por un elemento semiconductor, que cambia su resistencia dependiendo de la corriente que recibe y del estado del semiconductor. El efecto ocurre en el espacio intermedio entre ambos materiales, en el que se forma una especie de capa que sirve de barrera (de ahí el nombre que adopta en ocasiones de *célula de capa- barrera* (barrier layer cells)) al flujo de electrones que marcha desde el semiconductor, normalmente selenio, al metal. Si el metal se hace muy fino en forma de una película semitransparente, al ser iluminado, la luz pasa a su través, llegando a la capa barrera donde se produce una diferencia de potencial que cambia a positivo el selenio. Las células de selenio presentan menos linealidad y más fatiga que los fototubos cuando la iluminación se produce de forma continuada, y su sensibilidad queda afectada en mayor medida por el ángulo de incidencia de la luz.

A partir del final de la segunda guerra mundial, la fotometría se convirtió en una de las instrumentaciones más importantes dentro de los laboratorios, quedando definidas sus funciones básicas en tres áreas bien delimitadas: la medición de la cantidad de luz, la determinación de la temperatura de color, y la medida de la distribución angular del flujo luminoso procedente de las fuentes lumínicas. Para la medición de la intensidad de las fuentes, normalmente han sido los *iluminómetros*, una variedad de fotómetro, los dispositivos destinados a estos fines. Los *colorímetros* y los *pirometros* han sido, respectivamente, los instrumentos más utilizados en la medición de las distintas radiaciones lumínicas, en relación a su distribución espectral y su temperatura. Ambos han sido fuertemente potenciados desde el desarrollo de las células fotoeléctricas. Por último, los dispositivos fotoeléctricos han cubierto también el área de la fotometría ligada a la medición de los fenómenos de la reflexión, la transmisión y emisión de luz por distintos tipos de fuentes y materiales. Así, los *reflectómetros* y *goniofotómetros* se han encargado de medir la reflexión, ya sea especular o difusa, o los ángulos de incidencia. Tanto los fototubos como las células de selenio, se han utilizado también en el estudio de los volúmenes de luz por medio de los *fluorímetros*, instrumentos normalmente de gran aplicación en el estudio de sustancias fluorescentes y de materiales que han sido sometidos a procesos de fluorescencia. Es el caso de los fenómenos de luminiscencia, donde la fotometría ha sido clave para la determinación de niveles de turbiedad en el aire o en películas finas formadas por compuestos químicos; en el análisis de la dispersión de luz ocasionada por la distribución molecular de distintas soluciones o compuestos, como polímeros; o en el estudio de los índices de refracción de líquidos, con la ayuda adicional de *refractómetros*.

En el campo de la espectrofotometría, los fototubos multiplicadores cobraron también gran importancia, debido principalmente a las ventajas que ofrecieron en cuanto al control de los niveles de exposición y a la evaluación del espectro, registrado en un principio en fotografías convencionales. Este tipo de estudios se llevaba a cabo con la ayuda de un microfotómetro, construido *ad hoc*, que proyectaba la luz de una lámpara de tungsteno sobre la placa fotográfica para facilitar la tarea del fototubo en su lectura de las densidades. A principios de los cuarenta, comenzaron a construirse los primeros *espectrofotómetros* que podían prescindir de la lectura de espectros fotográficos, llevando a cabo las mediciones directamente con niveles de resolución y de sensibilidad equiparables a la espectrofotometría fotográfica. Además presentaban la ventaja de un ahorro de tiempo considerable, al prescindir del procesamiento de revelado de las placas, y por no estar sujetos a las variaciones espectrales consustanciales al método

fotográfico<sup>25</sup>. En la figura adjunta (Figura 5.1), aparecen dos espectrogramas del hierro, relativos a la espectrografía representada por la porción central de la imagen. En el gráfico superior ésta es analizada con un microfotómetro convencional, y en el inferior, es generada exclusivamente por medio de detección fotoeléctrica. Las diferencias en cuanto a sensibilidad y resolución son más que evidentes.

Este proceso de cambio de una tecnología tradicional basada en medios fotográficos a una puramente electrónica, se produjo de forma generalizada en el conjunto de la instrumentación. Tal fue el caso de las distintas espectrometrías, las emulsiones nucleares, o de la instrumentación aplicada a fines industriales y de fabricación de equipos. Por ejemplo, el control de la fabricación de monitores destinados a la incipiente industria televisiva, se llevó a cabo con espectrorradiómetros basados en tecnología de fototubos. Las curvas de distribución espectral, relativas al material fosforescente de los monitores, así como de otros materiales utilizados, se presentaban al instante en pantallas de tubos de rayos catódicos (Fig. 5.2).



*Fig. 5.1. Parte del espectro del hierro registrado por medios fotográficos y electrónicos. 1949.*



*Fig. 5.2. Espectrorradiómetro para medición del fósforo en pantallas de TV. El espectro sale directamente en un CTR de 12 pulgadas. 1949.*

Otro campo de creciente aplicación de la espectrofotometría fue en el análisis de las diferentes sustancias presentes en el aire, la atmósfera, o en determinados gases y emanaciones. Los fototubos llegaron a ser un dispositivo muy valioso en la detección de elementos químicos de distintos medios como las cantidades de vapor en la atmósfera, la presencia de gases venenosos en el aire o en el interior de plantas químicas, a través del análisis de sus líneas espectrales. En el campo de la detección y medida de radiaciones de partículas, o de rayos X, la fotometría electrónica obtuvo muy pronto una gran reputación, gracias a los análisis comparativos que podían hacerse *in situ* y de forma instantánea, a través de la presentación en paralelo de las curvas espectrales de la muestra y de otras normalizadas.

La presencia de los fototubos en los procesos de control y automatismo industriales fue cada vez mayor en todas las áreas de la producción, desde la textil a la alimentación, o desde la metalurgia a las impresiones gráficas. Dispositivos de seguridad, autocontrol, detección de radiaciones y emanaciones, comenzaron a ser habituales en empresas, oficinas y plantas industriales. El análisis espectroquímico por estos medios, facilitó también las tareas de análisis de muestras, ahorrando al menos una cuarta parte del tiempo que se venía empleando por medios fotográficos. Tal fue el caso de la fabricación de materiales plásticos o de aleaciones metálicas para la industria del automóvil.

Evidentemente, el área práctica donde las células fotoeléctricas han gozado de mayor popularidad ha sido en la fotometría aplicada a la fotografía en todas sus formas y usos, tanto científica como artística, documental, o doméstica. Los fotómetros más convencionales (Ver Figura 4.23. y 4.24), han sido normalmente contruidos con células fotoeléctricas de selenio, una tecnología que se impuso en el campo profesional fotográfico de forma inmediata, y que sigue vigente hasta nuestros días, a pesar de los grados de automatismo que la era digital está aportando. Básicamente, todo fotómetro consta de una célula fotoeléctrica, un microammetro y un dial con diferentes escalas que nos dan información acerca de la relación *velocidad de obturación/ diafragma*, respecto de la sensibilidad elegida para el material fotosensible. Estas unidades *E/V* (Exposure/ Velocity) son arbitrarias, y están referidas a los niveles de luminancia o brillo que detecta la célula, mediatizada por la presencia de una tapa difusora que se coloca entre ella y la fuente de luz. Cuando la tapa es retirada, y la luz incide en el plano de la célula, el fotómetro ofrece una escala directa de la intensidad de la luz en unidades denominadas candelas/ pie, o lúmenes/ pie cuadrado. Hay que señalar que las cantidades e intensidades de luz son unidades que se resiten a ser fijadas en términos físicos con un carácter absoluto, dado los componentes psicológicos y fisiológicos involucrados. Los conceptos de *potencia*, relativo a las fuentes luminosas; de intensidad de la luz que incide sobre un objeto; de *intensidad reflejada* por el mismo, o el de *energía total* emitida o recibida, son conceptos que son barajados normalmente en los ámbitos de la fotografía científica<sup>26 y 27</sup>

Por lo demás, cuando prestamos atención no al flujo de luz que incide sobre los objetos sino a la cantidad de luz que reflejan las superficies, nos estamos refiriendo a los conceptos de luminancia y brillo. Las unidades de medición vendrán dadas, en este caso, por las unidades de potencia de luz que inciden sobre ellas y por el factor de reflexión de la superficie en cuestión. Las unidades más utilizadas son el *Nit* y el *Foot Lambert*. El primero es el equivalente a una candela por metro cuadrado; y el segundo, es un lumen por pie cuadrado. El factor de reflexión es el cociente entre el flujo reflejado y el incidente; por tanto, será siempre menor a la unidad. Hay que señalar que el término brillo no está referido a una variable numérica o a una medida fotométrica cuantificable, sino a una medida de la sensación visual. Por último, decir que la relación de las unidades de intensidad lumínica cuando se relacionan con el tiempo, hacen mención a la cantidad total de energía que incide o reflejan los cuerpos. Sus unidades serían el Lumen/ segundo o el lux/ segundo. El fotón o *cuanto* de luz sería la unidad mínima que puede ser emitida o recibida por un cuerpo. Es un término teórico que está relacionado con la longitud de onda. Su valor es inversamente proporcional al valor de ésta, por lo que un fotón perteneciente a una radiación situada en la franja del espectro de longitudes de onda más corta, léase por ejemplo, la luz ultravioleta, sería de una magnitud superior a uno perteneciente al lado opuesto del infrarrojo.

El hecho de que fotometría y radiometría sean disciplinas estrechamente vinculadas, por estar dedicadas a la medición de la luz, ha obligado a la ciencia a llevar a cabo una continua actualización de los conceptos y términos relativos a las unidades de iluminación y potencia. Es esta una materia que ha estado sujeta a continuas redefiniciones a lo largo de la historia. El hecho de que los componentes subjetivos involucrados en el estudio de la luz desempeñen un papel determinante, ha sido uno de los principales motivos de esta revisión, así como la expansión del interés científico hacia la amplia gama del espectro electromagnético, más allá de la franja visible. Es sintomático de esta indefinición que la última revisión de los valores y los nombres de las unidades de radiación óptica se haya producido en 1970, por la *Comission Internationales de L'Eclairage*, en una disciplina, cuyos orígenes se remontan a la primera mitad del siglo XVIII, cuando Bouger y Lambert formularon las primeras leyes de fotometría. Mientras la radiometría está referida fundamentalmente a la medición de la energía radiante dentro de los fenómenos



que se producen en el espectro óptico (UV, Visible e IR); la fotometría está dedicada a la parte visible de ese espectro, teniendo como referente el sistema visual humano o aquellos instrumentos de observación y medida, cuyo comportamiento es similar a éste. El esquema conceptual vigente en torno a los fenómenos de la luz y la instrumentación dedicada a su estudio - entre ella, todo el aparato de producción de imagen tecnológica- establece una separación básica entre tres elementos: fuente de luz, escena u objetos y sensores. A cada uno de ellos, le corresponde los conceptos de flujo radiante o luminoso, intensidad radiante o luminosa, radiancia o luminancia, e irradiancia o iluminancia, dependiendo si los observamos desde la radiometría o la fotometría. Y en ellas prevalece una unidad de medición determinada: *watio* (W) y *lumen* (lm) para las medidas de flujo; *watio/ esterradián* (W/sr) y *candela* (cd) para las de intensidad; *watio/ m<sup>2</sup>* (W/m<sup>2</sup>) y *Lux* (lm/m<sup>2</sup>) para las unidades de irradiancia e iluminancia; y *watio/m<sup>2</sup>. esterradián* (W/m<sup>2</sup>.sr), y *nits* (lm/m<sup>2</sup>.sr) para las de radiancia e iluminancia, respectivamente. Por tanto, las unidades involucradas son esencialmente las de potencia, intensidad, ángulo de incidencia y reflexión, y de área de emisión y recepción. El término *brillo*, tradicionalmente sujeto a numerosas malinterpretaciones, puede hacer mención a la radiación emitida por la escena o el objeto, o la referida al sensor. En todo caso, se trata de un concepto que no puede desligarse de su componente subjetivo, pues su definición y valor corresponden a lo que es percibido por un *observador medio*, aplicándose tanto a la radiancia como a la luminancia.

### 5.3. Más allá de la plata: otros sistemas de producción de imágenes

La fotografía de las sales de plata ha gozado de un claro protagonismo en el conjunto de aplicaciones científicas, artísticas y documentales durante un largo período de tiempo que se aproxima al siglo. Como consecuencia del auge de las técnicas de generación de imágenes por procedimientos foteléctricos, y de la consolidación de los sistemas reprográficos a partir de la tercera década del siglo pasado, este predominio comenzó a ser cuestionado. Este declive progresivo se vio reforzado, en gran parte, por el despegue de un nuevo modelo de producción industrial y económico fundamentado en la información. Es cierto que la fotografía tradicional siguió poseyendo durante muchos años ventajas incuestionables, como su alta sensibilidad, la facilidad para producir grandes ampliaciones, recoger en un mismo fotograma múltiples fenómenos y objetos de estudio, su sensibilidad ante una franja muy amplia del espectro electromagnético, la estabilidad de la imagen latente, su excelente gama de tonos, una capacidad de almacenamiento de la información visual muy elevada, durabilidad de los positivos y una excelente reproducción del color por métodos relativamente simples. Sin embargo, este panorama tan halagüeño comenzó a presentar algunas fisuras, tan pronto como los expertos dieron voces de alarma sobre las limitaciones de los recursos argentíferos en la naturaleza, el elevado coste de la plata<sup>28</sup>, y sus inconvenientes ecológicos; y en el terreno práctico, por ser un proceso lento, presentar un límite en la resolución de detalles para determinadas aplicaciones, o por ser superada por las técnicas fotoeléctricas en aspectos tan determinantes como la sensibilidad ante estímulos luminosos de intensidad mínima. Esta tendencia se vio favorecida por una sociedad y un sistema económico y militar nuevos, cada vez más necesitados de instrumentos de procesamiento de la información rápidos y fiables; especialmente, para labores de copiado y almacenamiento de documentos, de envío de textos e imágenes a distancia, y detección y registro de fenómenos y objetos ultraveloces.

La segunda guerra mundial se convirtió, en este sentido, en un auténtico laboratorio de pruebas para multitud de nuevas tecnologías, de las que salieron

triunfantes las más afines a la electrónica. La invención del transistor en la inmediata posguerra, no hizo más que asegurar esta tendencia hacia una paulatina *electronización* de la maquinaria en su conjunto. En el sector de la informática y de las telecomunicaciones, la capacidad de procesamiento y almacenamiento de la información prestada por las emulsiones, se vio ampliamente sobrepasada por los nuevos dispositivos de control y memoria, basados en soportes magnéticos y en tecnología de semiconductores mucho más rápido y eficaz. El camino emprendido por los procesos de producción industrial hacia niveles de automatismo cada vez mayores, se vio respaldado por el desarrollo de los grandes ordenadores de funcionamiento universal aparecidos tras la guerra. Estas máquinas, pronto comenzaron a salir de los ambientes militares y académicos para adentrarse en la industria en general y el sector servicios. La democratización de los bienes de consumo en los países más industrializados favoreció la producción de electrodomésticos procedentes de múltiples tecnologías, donde los componentes electrónicos estaban cada vez más presentes: desde televisiones a teléfonos, o desde cámaras fotográficas a radio-transistores. En el sector audiovisual, comenzó a producirse también una transición en el uso doméstico de las cámaras tomavistas y proyectores de películas de sales de plata (Súper 8, 16 mm, etc.) a las de soporte magnético, más económicas y asequibles a un gran público. En el ámbito de la sanidad y de las aplicaciones médicas especializadas, el predominio de las emulsiones se mantuvo firme hasta bien entrada la década de los setenta. Sin embargo, a partir del final de la guerra, los sistemas electrofotográficos y fotoeléctricos de producción de imágenes comenzaron a irrumpir con fuerza, especialmente en el seno de los hospitales y de los laboratorios científicos, dando lugar a sistemas mixtos donde los impulsos captados por dispositivos electromagnéticos eran registrados en emulsiones fotográficas, al tiempo que eran observados en vivo en circuitos cerrados de TV, con la ventaja adicional de poder ser grabados en cintas magnéticas junto a los datos numéricos. Este control mayor de la imagen, posibilitado por los nuevos medios electrónicos cada vez más automatizados, llegaría a ser un factor decisivo en el futuro de la imagen técnica.

A un mismo tiempo, el sector de las artes gráficas y de la reprografía se hizo omnipresente en la nueva sociedad a través de cientos de productos que rompieron con una tradición de décadas, dominada por las técnicas más afines a las sales de plata. Las necesidades del mercado industrial y de servicios se orientó favorablemente hacia el consumo de nuevas formas de reproducción gráfica, tales como el de *copia maestra* de impresión en ediciones tipográficas, el offset, el copiado y duplicación de documentos por procedimientos electrostáticos, transparencias, planchas para la producción de imágenes impresas en color, pruebas de impresión, tanto en blanco y negro como en color, impresiones en relieve, microformas, técnicas de escaneado, sistemas de envío de imágenes a distancia (telex, fax), y periféricos de ordenadores (plotters, impresoras, impresoras de gráficos).

Para finales de la década de los sesenta, el panorama de los sistemas de producción de imágenes había cambiado sustancialmente. Sirva de ejemplo el modelo propuesto por R. D Murray en el que los sistemas reprográficos, electrográficos y electrofotográficos cobran un gran protagonismo, llegando a ensombreceer los sistemas más convencionales ligados a la fotografía de sales de plata<sup>29</sup> (Cuadro nº 7). Es conveniente precisar de antemano, que el término *no convencional*, utilizado con insistencia durante estos años, en alusión al amplio espectro de sistemas no consumidores de plata, deja mucho que desear dado el curso de los acontecimientos y el desarrollo tan espectacular que algunas de estas técnicas han experimentado. De hecho, el término reprografía ha llegado a ser propuesto en ocasiones para albergar bajo su manto conceptual todo el conjunto de técnicas reproductivas, incluida la propia fotografía. Por consiguiente, son las impresiones por procedimientos de sales de plata, las que fueron consideradas en

Fotoquímicos	Fotoeléctricos	Otras radiaciones
Hierro, cromo, plomo, mercurio, vanadio, paladio, etc.	Electrofotografía.	Termografía e infrarrojos
Polímeros	Fotoelectrolítica	Radiografías (rayos X, neutrones, protones.)
Diazo (fotolíticos)	Fotodieléctrica	Sonido, vibración y presión: ultrasonido, fotoelasticidad, resonancia, radio, sonar, radar, etc
	Impresiones electrográficas.	Ultravioleta y luminiscencia
	Vesicular.	
Radicales libres	Inyección de tintas	
	Fotoelectrotérmica	
Fotocromismo	Transferencia	
	Fotoelectroforesis (Cromatografía)	Radiactiva: autorradiografía, gammografía.
Blanqueadores		

Cuadro nº 7. Sistemas de producción de imágenes sin plata.

determinados ámbitos, como no convencionales. Es sintomático de este proceso, el hecho de que a principios de los sesenta, el término *sin plata* (Non- Silver o Silverless Imaging Systems) fuera utilizado en el ámbito anglosajón para designar la amplia panoplia de nuevas formas de producción de imágenes técnicas resultantes de la fotoelectricidad, las artes gráficas y la reprografía, y que haya sido la fotografía clásica la que haya adoptado una clara posición de inferioridad en el panorama actual.

Una distinción básica resalta a simple vista tan pronto como atendemos a los enunciados capitales de cada una de las columnas en el cuadro, y llevamos a cabo una primera separación entre los procesos fotoquímicos de producción de imágenes y los fotofísicos. Dentro de los primeros, donde se encontrarían las sales de plata, destacan los que se basan en materiales como el cromo, el hierro, el mercurio, en compuestos químicos diazo, polímeros, radicales libres, metales haluros, y agentes blanqueadores. Por el contrario, entre los fotofísicos, encontramos tanto el grupo correspondiente a los procesos fotoeléctricos como el de *otras radiaciones*, con procesos dependientes de radiaciones y vibraciones que se encuentran más allá del espectro visible, tales como las térmicas, sonoras y de presión, resonancia magnética, rayos X, radiografía de neutrones y protones, o las emanaciones radiactivas, que dan origen a técnicas como la gammografía, la autorradiografía y el trazado nuclear en sólidos. Ni que decir tiene que el conjunto de estas técnicas obedece a un proceso dinámico que se construye a lo largo del tiempo, por lo que cada una de ellas se encuentra sujeta a redefiniciones, o a ser catalogada bajo criterios nuevos. Incluso, algunas pueden ser contempladas bajo el paraguas conceptual de un grupo distinto, o de dos o más grupos a la vez; y las combinaciones entre ellas, o los sistemas híbridos, marcan la pauta común.

Las aplicaciones más afianzadas de estos sistemas las encontramos en múltiples sectores de la producción industrial y de los servicios, como en la transmisión de facsímiles, ya sea de texto o de imágenes; en las impresoras y plotters asociados a los ordenadores, en las máquinas de cálculo, en detectores y registradores de señales eléctricas de diversa índole (vibraciones y sonidos, pulsos de constantes vitales, etc.); sistemas de fotocopiado, y de producción de transparencias, o en procesos fotorreproductivos de circuitos integrados.

Dado que gran parte de los procedimientos que aparecen en este cuadro han sido tratados a lo largo de estas páginas, o no mantienen una relación directa con aplicaciones científicas, he preferido prestar una atención mayor a métodos como la electroforesis y la cromatografía por el lugar de excepción que ocupan dentro de las técnicas de observación científica, no necesariamente debidas a la acción de la luz o de otras radiaciones.

### 5.3.1. La fotopolimerización

Muchas de las técnicas fotográficas que aparecieron de forma experimental durante el siglo XIX y principios del XX, o que incluso destacaron durante algunos años a nivel comercial hasta que fueron apartadas del mercado por la llegada de las placas de gelatina al bromuro de plata, reaparecieron curiosamente, una vez que la ciencia logró un conocimiento y control mayores sobre determinadas reacciones químicas. La *cianotipia* (Blue Print), por ejemplo, método ideado por John Herschel en 1842, basado en las sales de hierro, ha sido ampliamente utilizado por los estudios de ingeniería y arquitectura, hasta hace unos años, en la reproducción de esos planos tan característicos por sus trazos en blanco sobre fondo azul. Igualmente, se han rescatado procesos y materiales como el mercurio, platino, oro, paladio, cobre, goma bicromatada, u otras sales de plata, como el yoduro fundamentalmente, a raíz del auge de ciertas técnicas reproductivas, como en microelectrónica aplicada a la fabricación de circuitos integrados, fabricación de planchas de grabado para imprentas, reticulados, escalas de precisión para instrumentos, componentes hardware de ordenadores, etc. Entre todos ellos, sin embargo, destaca el procedimiento al asfalto, la técnica que dio lugar a las primeras fotografías de la historia, y que se ha revitalizado debido al auge actual de la ciencia de polímeros y de los estudios sobre los fenómenos de fotopolimerización.

El término fotopolimerización hace referencia a una reacción química que se produce por efecto de la luz, cuyo resultado es la formación de un compuesto conocido como polímero, en el que las moléculas quedan estrechamente unidas y adquieren un mayor peso. Un polímero es una molécula de gran tamaño, formada por unidades más pequeñas llamadas monómeros, que se encuentran estructuralmente repetidas. La polimerización tiene lugar cuando un monómero, u otra molécula llamada *activador* (initiator), entra a formar parte del sistema; entre otras razones, por contar con suficiente energía, proveniente de la absorción de luz. En este proceso, se activan otros productos de corta duración que se llaman radicales libres. Estos son los mayores responsables de la formación de los polímeros, una vez que han sido expuestos a la acción de la luz.

La fotopolimerización es, en realidad, el procedimiento más antiguo que se conoce por el que se consigue un cambio de color de los materiales por efecto de la luz. Los egipcios utilizaban una mezcla de aceite de lavanda y alquitrán de Siria para embalsamar sus momias; entre otras razones, porque era una combinación de sustancias que quedaba fuertemente entrelazada, una vez secada al sol. Los polímeros fotosensibles son los que se encuentran en la base de la mayoría de los procedimientos fotográficos que conocemos. Las primeras fotografías de la historia, tomadas por Nicephore Niepce desde la ventana de su casa, fueron hechas con lo que hoy denominaríamos materiales polímeros. Recordemos que sus intentos por mejorar la recién inventada técnica de la litografía, le llevaron a experimentar con distintos compuestos químicos, hasta que encontró el betún de judea, un alquitrán próximo al utilizado por los egipcios. Lo disolvió en petróleo, y lo untó en una capa fina sobre una piedra, observando que las partes que exponía a la luz se adherían con fuerza a la piedra. Luego, utilizando cristal en vez de



piedra, logró ver una imagen al trasluz. Este procedimiento se considera hoy día, a los ojos de la química moderna, como de fotopolimerización. De hecho, no fue hasta 1945 que el fenómeno de la formación de polímeros se definió con criterios científicos; concretamente por W. E. F. Gates, al formar un tipo de metacrilato con la ayuda de radiación UV y calor. Desde entonces, la fotopolimerización ha entrado a formar parte no sólo de los procedimientos fotográficos, sino que se ha convertido en un fenómeno fotoquímico ampliamente estudiado y con un gran protagonismo en la ciencia y la tecnología de nuestros días. Los polímeros más utilizados son los derivados de la celulosa, del polivinilo, las poliamidas, o el polietileno. A nivel atómico, el proceso de la fotopolimerización consiste en la acción de un fotón sobre un monómero, lo que da lugar a la formación de un polímero por una reacción en cadena. Es un proceso que puede ser altamente controlado, y cuyos productos presentan una gran durabilidad. Estas cualidades están ayudando a desarrollar productos fotográficos de gran velocidad y altamente controlables, muy idóneos para impresiones tipográficas, litográficas, fabricación de circuitos integrados, reproducciones en el campo de las ingenierías, reproducciones en color, holografía, etc.

Por la fotopolimerización es posible reproducir gran parte del espectro electromagnético. Aunque su ámbito de aplicación se extiende desde el IR al UV, incluyendo desde luego la franja visible, la fotopolimerización tiene sus aplicaciones prácticas más importantes en materiales sensibles a la franja del UV. Dentro de los sistemas fotográficos *no convencionales* es uno de los más rápidos; situándose sólo por debajo del fotográfico de sales de plata, y del electrofotográfico. Hasta el momento, se utiliza por técnica de contacto mayormente, y con luz UV. En las intensidades altas y bajas de iluminación presenta problemas de reproducción; pero, por lo general, consigue calidades comparables a las sales de plata. A partir de la década de los sesenta, se logró reproducir por este procedimiento imágenes en color. Se ha utilizado con frecuencia en la fabricación de planchas de impresión en el sector de las artes gráficas, en sustitución de las planchas recubiertas con materiales coloides dicromatados; en fotograbado, fabricación de planchas de litografía, de patrones de estarcido, en procesos de electrograbado, en planchas para rotativas de prensa gráfica, para la elaboración de mapas geográficos tridimensionales a partir de la utilización de placas en relieve, o en cromalinas (Custom-Toning film, de Du Pont). Su presencia es cada vez mayor en el sector de las impresiones por ordenador, microfilms, registro de imágenes procedentes de tubos de rayos catódicos, hologramas, laser e impresiones en color.

### 5.3.2. La diazotipia

Otro procedimiento que cobra importancia por días es la diazotipia. El diazo es un compuesto orgánico descubierto por P. Griess en 1860<sup>30</sup> que presenta una descomposición fácil ante el calor o la luz. Esta reacción se produce de forma especial frente al UV; en menor medida, con el violeta y el azul; y de forma rápida con otros compuestos orgánicos, dando lugar a diversas coloraciones (sales diazoicas o de diazonio). La diazotipia es un procedimiento fotográfico que se puede aplicar tanto a papel como a telas, y se lleva a cabo por contacto del original, normalmente traslúcido, con la superficie diazoica. Una vez impregnada esta última, se someten las dos capas a presión y calor, dando lugar a una imagen positivo, que sólo resta ser fijada. Los tiempos de exposición son muy largos, por lo que la operación puede hacerse con luz día suave, o con luz artificial intensa. El primero en conseguir copias estables mediante este procedimiento fue Gustav Kögel en 1917. Kögel era un monje benedictino, que se esforzó por encontrar una fórmula más cómoda y práctica para su trabajo de copiado de palimpsestos y de

documentos originales. Su descubrimiento de los anhídridos de diazo para estos fines, le llevó a patentar un procedimiento fotográfico para copiado, conocido como *ozalid*. Los tintes que era preciso añadir a su fórmula, los obtuvo de la empresa de productos químicos Kalle, con la que se asoció para poner en el mercado esta técnica, que cosechó un gran éxito.

Las diazotipia muestra meros trazos de colores, fuertemente contrastados, que van desde un rojo violáceo a un marrón oscuro. En su día, esta técnica fue aventajada solamente por las de carácter fotomecánico, imponiéndose entre las de carácter fotográfico, especialmente para tareas de reproducción de imágenes formadas por trazos. La diazotipia contó con una gran popularidad en Europa desde su aparición hasta bien entrado los sesenta en el siglo XX. A partir de estos años, añadió a sus procesos materiales diazo revelables con calor. Ya en los setenta, experimentó un nuevo auge, debido a la creación de una serie de técnicas derivadas, que se empezaron a utilizar en procesos litográficos, offset, materiales fotoconductores (photoresist), en la fabricación de transparencias utilizadas en la reproducción de documentos, especialmente de dibujos técnicos; y en material de oficina, para fines de contabilidad y archivo. Por otro lado, ha encontrado un gran campo de aplicación en el sector de las impresiones en plásticos, cristales, tejidos, etc., destacando en la confección de prendas de vestir de polyester, con textos e imágenes estampados. Por último, se ha aplicado en la fabricación de película negativa para fotografía aérea y de reconocimiento, estando su desarrollo limitado por la baja sensibilidad a la luz, si la comparamos con las emulsiones de sales de plata, o con los procedimientos electrofotográficos.

Una variante de la diazotipia es la imagen *vesicular*. En este caso, el proceso de absorción de la luz es sustituido por la dispersión; y el revelado de la superficie expuesta se hace mediante calor. El proceso fue implantado a mediados de la década de los cuarenta, siendo denominado originalmente de “burbujas”. Obtuvo una cierta aceptación, al ser perfeccionado gracias al uso del poliéster y de la gelatina. Su fabricación llega hasta nuestros días, por firmas como Kodak, IBM, 3M, Kalvar, Photomedia, o Memorex. El proceso es más rápido que el diazo normal, pero presenta el inconveniente de que su resultado es una imagen negativo. En este caso, se dispone de una lámina muy delgada de diazo, que recubre una película de base poliéster. Una vez que la lámina se pone en contacto con un original traslúcido, se expone a luz UV; esta acción hace que el compuesto diazoico se descomponga liberando hidrógeno en forma de gas. La imagen se revela haciéndola pasar por unos rodillos calentados, que son los encargados de formar, por acción del hidrógeno, pequeñas burbujas en el plástico. Estas burbujas producen una dispersión de la luz procedente de la imagen original, a diferencia de las partes no expuestas. El fijado se lleva a cabo, exponiendo nuevamente todo el material a luz UV por el doble de tiempo. El resultado es una imagen negativa, contrastada. El proceso se hace enteramente en seco, por lo que es muy apropiado para labores de copiado y fabricación de microfilms.

### ***5.3.3. Fotografía de radicales libres***

La fotografía basada en el uso de *radicales libres* es otra forma reproductiva de imágenes dentro de este apartado dedicado a los procesos fotoquímicos más actuales. Al igual que en la fotopolimerización, ha sido el desarrollo de la química moderna el que ha hecho posible redefinir y rescatar esta técnica, que se ha utilizado desde tiempos inmemoriales. De hecho, fueron los fenicios los precursores de este procedimiento, al producir una serie de tintes con materiales que eran expuestos y secados al sol, y que aplicaban luego a los tejidos. Una dimensión más científica de esta tradición se fraguó a principios del siglo XX, a raíz

del avance producido en la química de polímeros y de productos sintéticos. A partir del final de la II guerra mundial, se inició la fabricación de este tipo de productos y su correspondiente comercialización en el mercado de la reproducción de imágenes. En líneas generales, el procedimiento se debe al uso combinado de productos compuestos de polihalógenos (hidrocarburos halogenados), y de radiación ultravioleta. El resultado es la formación de radicales libres que dan lugar a tintes, encargados de la formación de la imagen. Hoy día, la mayoría de las compañías especializadas tradicionalmente en la producción de material fotográfico o dedicadas a las artes gráficas, fabrican productos fotográficos basados en la técnica de radicales libres; especialmente para la impresión de libros, pruebas de imprenta, película aérea, duplicaciones, o registro de imagen generada por tubos de rayos catódicos.

#### 5.3.4. El fotocromismo

El *fotocromismo* hace mención a todo sistema de producción de imágenes que se fundamenta en compuestos que, por acción de la luz, son capaces de reordenar su estructura molecular, dando como resultado un cambio de color. Es un caso especial de un fenómeno más amplio, conocido como *fototropismo*, que es la capacidad que tiene un material dado para cambiar de color de forma reversible, por acción de la radiación electromagnética. En realidad, esta reversibilidad del proceso fotocrómico obedece a un proceso de equilibrio del material respecto de su ambiente. Son los procesos térmicos, y los de absorción y emisión de luz (fosforescencia), los que actúan sobre el material en una relación de interdependencia. Existen múltiples materiales fotocrómicos, tanto orgánicos como inorgánicos, que son utilizados en estas técnicas<sup>31</sup>. La ventaja que ofrece este procedimiento es su reversibilidad, hecho que permite que la imagen generada pueda ser borrada y utilizada de nuevo, o fijada de forma permanente si así se desea. El desarrollo de esta técnica comenzó a producirse mayormente a partir de la última guerra mundial, siendo investigada en los ámbitos gubernamentales con gran secretismo, al menos hasta mediados de los setenta. Desde entonces, la investigación ha sido abordada por numerosas compañías, en áreas destinadas a la fabricación de filtros, técnicas de reducción de documentos en soporte película, pruebas de impresión desde de negativos, máscaras fotográficas para procesos de impresión, dispositivos de memoria, monitores (en fase de experimentación), dosimetría de UV, etc. Hasta el momento, los procesos fotocrómicos presentan una serie de limitaciones, que retrasan su campo de aplicación en la producción de imágenes, tales como la falta de un entendimiento completo de los mecanismos físicos y químicos involucrados, su baja sensibilidad, o una respuesta espectral limitada.

Dentro de este apartado de procesos fotográficos de carácter fotoquímico encontramos, por último, los procedimientos *blanqueadores* (bleaching out), consistentes en remarcar con tinta o lápiz una copia fotográfica que ha sido revelada de forma suave. De este modo, muestran los trazos más sobresalientes de la imagen, proceso que se completa con lavado con compuestos químicos, que hacen desaparecer la imagen original<sup>32</sup>. Por último, se procede a la fijación de la copia, quedando el dibujo delineado sobre fondo blanco.

### 5.3.5. Procedimientos electrofotográficos y electrográficos

Dentro de las técnicas pertenecientes al grupo basado en procesos fotoeléctricos no convencionales, encontramos básicamente las técnicas electrofotográficas y el conjunto de técnicas de impresión electrográficas, ambas ampliamente comentadas en capítulos anteriores ( ver Cap. 2.7.). En esta ocasión, se presta una mayor atención a sus desarrollos más actuales y afines a la ciencia y la tecnología; sin perder de vista que se trata de técnicas que se encuentran presentes tanto en las técnicas fotográficas clásicas de sales de plata, como en las fotoeléctricas convencionales, como el oscilógrafo y la televisión. Además, gran parte de ellas está íntimamente relacionada con la industria reprográfica, de artes gráficas, la informática y las telecomunicaciones.

A partir de los años veinte, la demanda de técnicas reproductivas de todo tipo de documentos, integrados por textos e imágenes, creció al ritmo marcado por una nueva sociedad volcada en el sector de los servicios. Los dispositivos electrofotográficos vinieron justo a tiempo para cubrir una necesidad que los procedimientos tradicionales no podían satisfacer; especialmente en impresiones y reproducciones a gran escala, en la transmisión y recepción de información escrita y gráfica, y en tareas de archivo y memoria de documentos. Los papeles y películas fotográficos fueron sustituidos por procedimientos de impresión más baratos y rápidos, como el *papel electrolítico*, técnica inventada a mediados del siglo XIX, y que cobró protagonismo en las primeras décadas del siglo XX, mayormente para uso en la transmisión a distancia de textos e imágenes en el ámbito de la prensa, o en la generación de gráficos (ver Cap. 2.7.3.). Presentaba algunos inconvenientes, como ser una técnica procesada en húmedo, lo que obligaba a utilizar papel de cierto grosor y textura; también su extremado contraste, y una fijación un tanto débil de las imágenes. Pronto fue sustituida por un procedimiento similar, con uso de papeles electrosensitivos en seco. (Burn- Off Papers). Esta nueva técnica comenzó a implantarse en la década de los veinte del siglo pasado, utilizando en un primer momento papel fotográfico de reacción lenta. Tuvo gran aceptación en el ámbito de las comunicaciones telegráficas, cuyo primer producto fue el *teledelto* de la Western Union; así como en la producción de facsímiles, registro de señales eléctricas pertenecientes a fenómenos de alta velocidad; en estudios oceanográficos, en los primeros modelos de impresora asociadas a ordenadores; en registro de señales de voz, en calculadoras, o generadores de gráficos, tipo plotters. Se trata de una técnica que, por lo general, hace uso de papeles impregnados de un tipo de carbón en polvo, conductor de electricidad. El papel queda de esta manera sensibilizado al paso de un estilete, movido por descargas eléctricas en consonancia con los trazos, letras o imágenes que se quiere reproducir. Esta técnica mejoró sustancialmente la reproducción de la gama de grises, al utilizar procedimientos provenientes del fotograbado; concretamente las del grabado en relieve.

Los procedimientos electrolíticos fueron superados por las técnicas de grabación e impresión *fotoeléctricas*. Recordemos que este tipo de sistema de reproducción tiene sus orígenes en las figuras de Lichtenberg, y que básicamente se trata de un procedimiento que utiliza un papel recubierto con una fina emulsión dieléctrica que lo hace conductor. Lo que comenzó siendo un medio rudimentario de obtener figuras geométricas a partir de descargas eléctricas aplicadas a una superficie resinosa, rociada de polvo o arena, dio origen con el tiempo a las distintas técnicas xerográficas. Los primeros resultados prácticos en este sentido, fueron dados por Carlson en la década de los treinta, en Estados Unidos; luego en 1944, la técnica fue rebautizada por M. Langer<sup>33</sup> con el nombre de electrofotografía, abarcando numerosos sistemas de registro, reproducción y envío de documentos, de la importancia del electrofax, de las múltiples técnicas electrográficas,



transmisores y receptores de imágenes por cable, o los primeros sistemas de impresión asociados a ordenadores. El término xerografía proviene del griego *xeros*, que significa seco. Fue adoptado por la industria americana en 1948; en concreto por la Haloid Company, de Rochester, que sería conocida posteriormente como Xerox. Esta compañía presentó su primer modelo de fotocopidora en 1950. El desarrollo masivo de este tipo de técnicas fotodieléctricas vino dado por el despegue de los grandes sistemas informáticos y de las modernas telecomunicaciones a partir del final de la II Guerra Mundial. El procedimiento original, y que se ha mantenido fiel a sus principios básicos hasta nuestros días, consiste en utilizar una placa metálica conductora, recubierta de una capa fina de un material fotoconductor, originalmente selenio. Previo a su utilización, la placa es sensibilizada mediante una descarga electrostática; luego, al recibir la luz, correspondiente a la imagen que queremos reproducir, las partes iluminadas se descargan eléctricamente. Acto seguido, se rocía la placa con un polvo negro (toner) con carga de signo contrario a la placa. De esta manera, se logra una adherencia discriminada del polvo a aquellas partes que están cargadas por no haber sido expuestas a la luz. Una vez obtenida así la imagen, sólo resta fijar el polvo al papel de forma permanente mediante calor.

Existe una variante de esta técnica para aplicaciones electrográficas, que consigue efectos similares mediante la utilización de un estilete. En este caso partimos de una superficie conductora de electricidad, normalmente un papel de alta resistencia que se reviste de un material dieléctrico al pasar por un rodillo. Luego, un estilete o punzón, que hace las veces de electrodo grabador, va marcando con un alto voltaje la superficie del papel en aquellos puntos que se corresponden con la imagen que queremos reproducir, o al dictado de señales producidas por algún dispositivo generador de impulsos eléctricos. Estos puntos del dieléctrico, ahora cargados eléctricamente, forman una imagen latente. El revelado consiste, como en el modelo anterior, en adherir al papel un polvo o pigmento (triboelectrónico), cuya carga es contraria a la que tienen los puntos marcados en el papel. La fijación de la imagen resultante se lleva a cabo por medio de presión o calor, produciéndose una fusión del polvo o toner con el papel. Estos sistemas de reproducción electrostáticos pronto se aplicaron a las nuevas impresoras de los ordenadores, a la transmisión de textos vía télex, a la impresión de gráficos meteorológicos, cotizaciones de bolsa, noticias, etc. En la década de los sesenta, comenzaron a ser aplicados en la grabación digital de la información, en cintas de papel y tarjetas perforadas, que podían ser leídas o escaneadas rápidamente, y sus datos ser guardados con la ayuda de los nuevos sistemas de almacenamiento de información. El uso de tambores y de cabezales de impresión múltiples agilizaron las impresiones provenientes de los ordenadores. También, oscilógrafos, tubos de rayos catódicos, o la reciente tecnología del vídeo se vieron favorecidos por estos procedimientos de grabación dieléctrica, especialmente en centros de meteorología, del ejército, editoriales, y grandes compañías públicas y privadas. Hacia el final de los sesenta, estos sistemas de producción de imágenes dominaban el mercado de los ordenadores, del fax y de las grabaciones analógicas, en el que destacaron las compañías estadounidenses y japonesas.

Una variante de estos sistemas vino dada por aquellos procedimientos que producen imágenes en superficies sensibles a la presión. Son parecidos a los papeles electrosensitivos al calor (Burn Off Papers) que vimos anteriormente, con la diferencia de que contienen varias capas; una, normalmente de carbón; y otra, superficial y transparente, fabricadas en ceras. La presión ejercida sobre esta última, mediante un punzón o estilete, la hace traslúcida; y esto permite aflorar de forma automática la figura o los trazos sobre la primera. Este tipo de técnica se ha utilizado normalmente en la impresión de gráficos y tablas, y en el fotocopiado de documentos durante las décadas de los cincuenta y los sesenta. El efecto reproductor se puede obtener también por medios químicos, fabricándose el papel

con pequeñas microcápsulas de algún compuesto pigmentoso, que reacciona a la presión, rompiéndose, con la consiguiente formación de la imagen. Otro tipo de papel por presión, muy utilizado en las impresiones por ordenador, escáneres para facsímiles, en gráficos meteorológicos y en xerografía a distancia, es el que hace uso de una capa de papel carbón, y de otra en blanco, que es la que recibe el trazo por presión. Estas técnicas tienen sus antecedentes directos en los tradicionales papeles de calco, utilizados desde principios de siglo en las oficinas. Como resultado del espectacular desarrollo de la química de polímeros, ha proliferado la fabricación de materiales de impresión vesicular, con cápsulas contenedoras de tintes. Estas son muy sensibles ya sea a la presión manual, o a la de máquinas de escribir, impresoras; o a la acción de determinados ácidos que logran romperlas y desprender un determinado color. Compañías como NCR, 3M, Kores, o Xerox, han fabricado con éxito este tipo de papeles durante décadas, hasta entrar en declive con la llegada de los ordenadores personales y de las redes internacionales de comunicación de datos, proclives al uso de impresoras portátiles por inyección de tintas.

La inyección de tinta es un procedimiento electrográfico que ha tenido gran repercusión en las impresiones por ordenador. La automatización de la impresiones múltiples ha sido posible gracias a este tipo de procedimiento. Y su éxito, desde la década de los setenta, se debe fundamentalmente a su adaptación al procesamiento de la información, por evitar la rigidez de los sistemas anteriores, y por la posibilidad de usar papel de cualquier tipo, o incluso materiales como plásticos o metales. El origen de este tipo de sistema de impresión lo encontramos en las grabaciones oscilográficas; con la diferencia de que si en estas últimas, la inyección es de forma continua, en los actuales sistemas es por medio de pequeñas gotas. Los primeros sistemas de impresión por inyección se remontan a la década de los sesenta<sup>34</sup>, cuando fueron aplicados a tiras de papel que iban deslizándose bajo la acción del chorro de tinta. Esta iba cubriendo la superficie del papel en consonancia con la deflexión producida por dos electrodos. Las partículas de tintas, sujetas a la influencia de los campos eléctricos, se asemejan a los electrones producidos en el interior de los tubos de rayos catódicos. Las posiciones X e Y de los puntos de tintas en la superficie a imprimir, vienen dadas por la acción de campos eléctricos, tal como ocurre en la proyección del haz de electrones sobre las pantallas fluorescentes de este tipo de tubos.

Las impresiones por chorro de tinta proliferaron en el campo de la informática, dando lugar a las primeras impresoras; en el ámbito industrial, pasaron a convertirse en un elemento imprescindible en labores de marcación y etiquetado de productos, impresión de direcciones en cartas, reproducción de informes; y en el terreno científico, fueron decisivas en la generación de EEG y ECG, o gráficos de centelleadores. A principios de los setenta, permitieron impresiones en color, especialmente aplicadas en el campo de la generación de gráficos por ordenador, y en impresiones coloreadas de imágenes radiográficas, obtenidas con uso de contrastes, donde destacó el sistema *Sicograph*, de Siemens.

### **5.3.6. La termografía**

Los procesos térmicos afectan a gran número de técnicas reproductivas, bien de forma directa o en conjunción con fenómenos eléctricos y lumínicos. En capítulos anteriores hemos tratado ampliamente su relación con la fotografía de IR; y en capítulos posteriores, será contemplada bajo la perspectiva de los dispositivos fotoeléctricos ( ver Cap. 5.5.2.). En este apartado, por tanto, me limitaré a hacer un recuento de su aplicación en técnicas reprográficas, impresiones informáticas, y artes gráficas, fundamentalmente. Los sistemas reproductores, basados en

películas y papeles sensibles al calor, han proliferado en el campo de la xerografía, de las impresiones de documentos, imágenes y gráficos, de las tele- impresoras, calculadoras, e impresiones por ordenador. En la reproducción de gráficos se han utilizado comúnmente estiletes de puntas calientes, que tienen la capacidad de derretir emulsiones a la cera en papeles de color de base negro, a semejanza de las técnicas reproductivas por presión. Se suelen utilizar en el campo de la instrumentación médica e industrial, por su rapidez y comodidad. En el ámbito de la reprografía, se han utilizado papeles bañados en una emulsión termo- sensitiva, transmisora de IR. Aquí, el documento original que se quiere copiar debe contener imágenes absorbentes del IR, normalmente realizadas con lápiz de carbón, tinta negra, o plata. El IR llega a este tipo de trazos e imágenes presentes en el material que se quiere copiar, pasando si dificultad a través de la hoja sensible al calor, que es indiferente a este tipo de radiación. En las partes blancas de la imagen, el IR es dispersado; por el contrario, en las partes trazadas es absorbido, produciendo calor. Este calor se transfiere, por conducción, al papel termosensitivo, originando una copia de la imagen original. En los sesenta, proliferaron las patentes de este tipo de sistemas, principalmente en el campo de las fotocopias, de las impresiones a distancia (telex y fax) e informáticas. Sus principales ventajas fueron su bajo costo, la ausencia de *toner* o de reveladores, ofrecer una imagen inmediata, un proceso en seco, y por hacer uso materiales resistentes. Por el contrario, presentaron el inconveniente de una escasa durabilidad, pues la imagen sufría un desvaimiento acusado en un año; y de un exceso de contraste de las copias. A partir de los setenta, proliferó el uso de impresiones térmicas, llevadas a cabo con matrices de cabezales térmicos, capaces de reaccionar en cuestión de microsegundos y basados en tecnología de transistores- resistores, y de microcircuitos. Estos sistemas son predecesores directos de las impresiones láser, que comenzaron su andadura a partir de los ochenta.

Un procedimiento térmico muy similar al anterior es el basado en los procesos denominados *fototermográficos*. Aquí, el calor es un elemento que funciona como revelador de una imagen latente, oculta en una superficie que ha estado sujeta previamente a algún tipo de radiación. Se utiliza en la fabricación de transparencias para proyecciones y en fotocopias. La radiación de IR atraviesa una lámina transparente en la que está depositado el material termosensitivo, y afecta a la copia original. La radiación reflejada por las zonas más claras de la imagen vuelve entonces en forma de calor a la superficie sensible, produciendo la imagen. En otras ocasiones, se utiliza material polímero termosensitivo e hidrofóbico, compuesto por pequeñas partículas, pigmentos de color y por una substancia absorbente del calor. Cuando este material es expuesto junto al original, las partes afectadas por la radiación (IR o luz intensa de flash) coagulan, y se convierten en insolubles al agua. Tras una operación de lavado, las distintas partes de la imagen se disuelven en consonancia con los niveles de exposición recibida y con los de radiación absorbida, lo que origina la imagen.

Un último procedimiento dentro de esta categoría, es el que se debe a un proceso de *transferencia*. En este caso, se utiliza una lámina intermedia, normalmente de composición oleosa, que se adhiere a la copia en la que se ha formado una imagen latente como resultado de la radiación. La conversión en positivo se lleva a cabo mediante la impregnación de la copia con polvos de toner, finalmente fijados con calor. Las aplicaciones de este tipo de termografía es básicamente en la producción de transparencias, copias y duplicados de documentos, impresiones mediante estilete térmico, grabacion mecánica y copias de fax.

### 5.3.7. La electroforesis y la cromatografía

La electroforesis y la cromatografía son dos técnicas muy cercanas entre sí, que obedecen, en líneas generales, a procesos de separación de sustancias de compuestos químicos por medio de la aplicación de campos eléctricos en una, y de determinados agentes disolventes en otra. Aunque ninguna de ellas se debe a fenómenos fotoquímicos o fotoeléctricos, el hecho de que sus resultados sean comúnmente registrados por fotografías, especialmente para labores de análisis, registro y comunicación, o de que sean técnicas de análisis que se apoyan en gran medida en resultados visuales, son razones suficientes para que sean incluidas en estas páginas.

La electroforesis es un procedimiento de obtención de imágenes, basado en el movimiento de partículas cargadas en un campo electromagnético unidireccional. En una solución compuesta por dos o más solubles iónicos, se obtiene una representación en una tira de papel humedecida en un disolvente. Al aplicarse una diferencia de potencial a la tira, los componentes presentes en la solución se mueven a un lado u otro, dependiendo de la carga de sus iones, y con una velocidad determinada. Las partículas se desplazan hacia el ánodo, o hacia el cátodo, originando unos movimientos que reciben el nombre de *anaforesis* y *cataforesis*, respectivamente. La electroforesis es un fenómeno que fue aplicado por primera vez en 1897, por Linder y Picton. Esta fue una época en la que los procedimientos electrolíticos y galvanoplásticos gozaban de una amplia implantación en la industria y en los laboratorios científicos. El procedimiento básico del análisis electroforético se mantiene intacto en su esencia hasta nuestros días, salvo por algunas innovaciones adquiridas a lo largo de los años como resultado del avance tecnológico. En sus orígenes, consistió en separar o purificar partículas presentes en compuestos químicos con la acción de un campo eléctrico. Este campo era producido mediante la inserción de dos electrodos en un líquido formado por las partículas de estudio diluidas en alguna sustancia aglutinante tal como la agarosa o el almidón. (Figura 5.3).

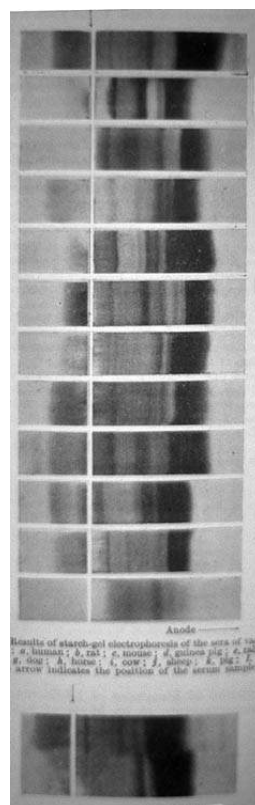
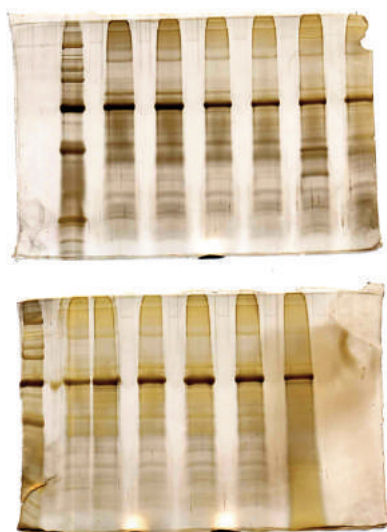


Fig. 5.3.  
Electroforesis  
en gel de  
suero de  
varios  
animales:  
humano,  
rata, ratón,  
cerdo de  
guinea, etc.  
1957

En la actualidad, uno de los campos de mayor interés y aplicación de esta técnica es en biología molecular, para el estudio de grandes moléculas y partículas coloidales, donde destaca el análisis de proteínas y la separación de aminoácidos. En el proceso de identificación de proteínas<sup>35</sup>, se suele adjudicar una carga negativa a la solución, de modo que la depuración se haga en base al peso atómico de cada una de ellas. Esta es una de las razones por las que la electroforesis, como la cromatografía, se encuentra íntimamente ligada a la espectrometría de masas. En este proceso de separación, se prepara un gel, o sustancia que sirve de entramado y filtro de las proteínas, y que está compuesto normalmente de plata, o de sustancias como el *coomassie*. Las proteínas, a su paso por el gel, adoptan una serie de posiciones de acuerdo a su peso molecular. Una vez completado el proceso de separación, se añade una serie de tintes, a fin de poderse visualizar las bandas y las posiciones que han tomado cada una de las



proteínas. La posición de las bandas, así como la cantidad de proteínas depositadas en cada una de ellas, nos proporciona un patrón que suele ser comparado con otros normalizados para conocer el tipo de proteína en cuestión.

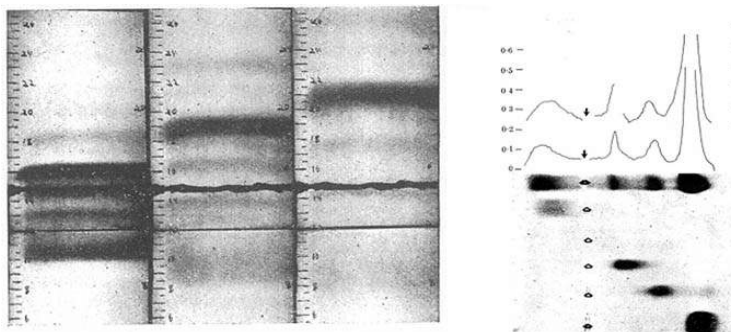


*Fig. 5.4. Electroforesis de proteínas, de una dimensión. Lab. Protómica. CBM CSIC. 2005.*

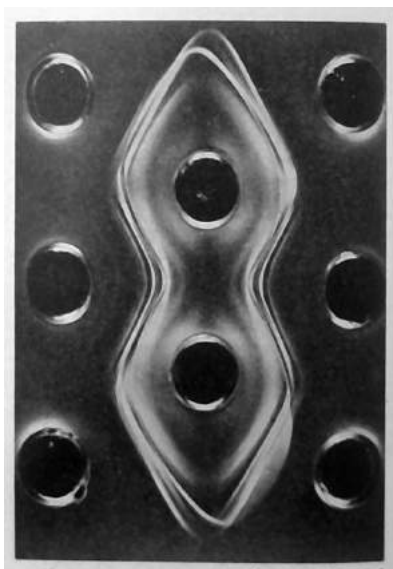


*Fig. 5.5. Electroforesis de proteínas, de dos dimensiones. Plata. Lab. Protómica. CBM Severo Ochoa. UAM. CSIC. 2005.*

Una vez obtenida la figura o patrón de bandas, podemos elegir una mancha en particular, perteneciente a una proteína, y analizarla en el espectrómetro de masas para obtener información sobre los aminoácidos que la componen. Cada uno de ellos viene determinado por la relación masa/carga y por la intensidad, variables que suelen quedar representadas en un gráfico. A diferencia de lo que ocurre en cristalografía y en la espectroscopía por difracción de rayos X, donde las muestras se mantienen intactas, en la electroforesis son desnaturalizadas al ser diluidas en el gel. Como en la cromatografía, la separación puede realizarse en dos fases, denominadas de primera y segunda dimensión, cuyos resultados son visibles a través de la forma y coloración que presentan las manchas. Hay que tener presente, no obstante, que este concepto de dimensionalidad no se corresponde con el iconográfico, tal como es entendido en óptica o en el conjunto de las ciencias de la imagen. En estas técnicas de depuración, las dimensiones obedecen a los diferentes estados (forma y coloración) que adquieren las manchas - en todo momento bidimensionales-, como resultado de la acción electroforética; en ningún caso, están referidas a dimensiones relacionadas con la estructuración espacial de una escena o un objeto. Si la primera dimensión nos dice de qué proteína en particular se trata (Figura 5.4.), la segunda nos proporciona el valor del punto isoeléctrico, por medio de la utilización de una franja de Ph (Figura 5.5). Mientras mayor es la carga, más base es la proteína, por el contrario, mientras menor es la carga, más ácida será. Además, esta segunda dimensión ofrece información sobre la relación entre peso molecular y carga.



*Fig. 5.6. Imagen compuesta de dos fotografías, y estudio densitométrico de manchas obtenidas por electroforesis. 1958.*



*Fig. 5.7. Fotografía de placas de difusión en agarosa. 1959.*

Los tintes utilizados desempeñan también funciones muy específicas. Mientras que los tintes a la plata proporcionan información sólo de carácter cualitativo (ver figura anterior), los de coomassie permiten análisis cuantitativos que pueden llevarse a cabo mediante densitómetros (Figura 5.6; y 5.7.) En este contexto, la fotografía y la fotometría fotográfica han prestado un gran servicio a las técnicas electroforéticas. A lo largo de los años, se han propuesto técnicas específicas para fotografiar las placas de sedimentación de la forma más ventajosa posible, a fin de obtener imágenes con suficiente profundidad de foco, altamente contrastadas, y con suficiente detalle en todas sus partes mediante la utilización de fuentes de luz situadas próximas a la normal de la superficie, y de aperturas y velocidades de obturación adecuadas<sup>36</sup>. Se han llevado a la práctica también, estudios fotográficos sobre el proceso de formación de las manchas de sedimentación en el tiempo, seguido de labores de entintado de las mismas para proceder a análisis cuantitativos densitométricos<sup>37</sup>. Esta línea de trabajo

ha conducido a la utilización de tintes fluorescentes, que presentan la ventaja de una mayor sensibilidad y limpieza de manejo, y su adecuación a la fotografía UV, práctica que continúa hasta nuestros días<sup>38</sup>. Con la incorporación de los dispositivos fotoeléctricos, la lectura del patrón se suele llevar a cabo por un analizador de imagen, que mide los niveles de fluorescencia mediante un láser, y que ofrece los resultados de forma informatizada. Con este tipo de técnica pueden obtenerse los espectros de absorción y de emisión, y rangos dinámicos (capacidad de discernir entre valores) de 1 entre 1.000 microgramos.

El proceso de análisis de proteínas por electroforesis se completa en numerosas ocasiones con el uso de *protesas*, sustancias que diseminan la proteína y la separan en péptidos. En este caso, el espectrómetro de masas proporciona una auténtica huella dactilar (PMF) de esta cadena de péptidos, o serie de aminoácidos presente en las proteínas. Los datos resultantes, facilitados por el espectrómetro de masas, se comparan con los de bases de datos internacionales que determinan el tipo de proteína en cuestión.

Por su parte, la cromatografía, nuestra segunda técnica de separación de sustancias, opera también en conjunción con la espectrometría de masas. Se trata de técnicas complementarias, pues donde terminan las labores de análisis de una, comienza el cometido de la otra. La primera separa las moléculas, y la segunda analiza qué tipo de moléculas son, o en el caso de átomos, nos dice de qué elemento se trata. Como en el caso de la electroforesis, nos encontramos con una técnica de análisis muy poderosa, que ha desempeñado un papel de primer orden en el contexto de la ciencia del siglo XX<sup>39</sup>. Sus orígenes se remontan también a finales del siglo XIX, coincidiendo con el auge de los estudios sobre hidrocarburos, donde cabe destacar a D. T. Day, C. Engler y E. Albert<sup>40</sup>; y de los trabajos emprendidos por Mikhail S. Tswett, en torno a la clorofila y los cloroplastos. En 1903, este último autor presentó de forma oficial el procedimiento cromatográfico, aplicado al análisis de la clorofila. Hacia 1910, perfeccionó la técnica vertiendo los productos resultantes de exprimir una serie de hojas en un tubo de cristal que contenía un sólido arenoso. A medida que el líquido descendía, se formaron una serie de franjas coloreadas correspondientes a las sustancias integrantes del líquido. Tras unos años de relativo olvido, la técnica volvió a resurgir en los años treinta, aplicada también al análisis de sustancias en plantas. Pero fue a partir del

final de la segunda guerra mundial que la cromatografía se convirtió en una de las técnicas de análisis químico de mayor protagonismo en los laboratorios científicos, en gran parte debido a la escasez de recursos propia de la posguerra, y a la relativa simpleza y economía de medios de este procedimiento<sup>41</sup>. En pocos años, la técnica se fue perfeccionando, hasta dar lugar a una serie de variantes muy específicas, como la *cromatografía de partición líquido- líquido*, la de *gas*, la de *cambio iónico*, la de *adsorción*, etc., todas ellas de gran aplicación en campos como la bioquímica, la botánica, la geoquímica, el estudio animal, o la medicina forense.

Las técnicas cromatográficas han sufrido también notables modificaciones a lo largo de los años, especialmente por la llegada de mayores niveles de automatismo en las tecnologías involucradas. En un principio, las dos variables que se medían eran la distancia recorrida por la sustancia en el tubo y el tiempo, ambas motivadas por la propia gravedad y por la capilaridad del medio de propagación. Hoy día, se suele representar en un eje de coordenadas la intensidad relativa al número de moléculas en cada sustancia, frente al tiempo de formación (tiempo de retención). La forma de representación clásica, por medio de franjas de colores visibles, ha sido sustituida por este eje de coordenadas a modo de diagrama gaussiano, que normalmente es expuesto en el monitor de un ordenador y que es fácilmente comparable con determinados patrones normalizados, relativos a sustancias conocidas.

Con el tiempo, se establecieron dos fases metodológicas muy concretas en la elaboración de toda cromatografía, que perduran hasta nuestros días: la *fase estacionaria*, que se corresponde con el compuesto, sólido o líquido, que se utiliza como elemento de decantación del proceso, y que es el lugar donde se forma la figura o patrón; y la *fase móvil*, que hace mención al proceso de separación en sí, consistente en asociar un gas o un líquido a la sustancia que examinamos, en su paso a través de la fase estacionaria. Originalmente, esta fase se llevaba a cabo con la utilización de un disolvente en el que se emplazaba la sustancia de estudio; luego, este compuesto se vertía en un tubo con un sólido determinado, que representa la fase estacionaria. La existencia en la actualidad de múltiples tipos de cromatografías, se ajusta a esta clasificación; pues dependiendo de qué elementos son utilizados en cada una de estas fases, o qué principio de separación rige el proceso, encontramos un modelo u otro. Así, por ejemplo, en la *cromatografía de adsorción*, tenemos que la fase estacionaria corresponde a un sólido; pero que la fase móvil puede estar representada bien por un líquido, lo que da lugar a la *Cromatografía Líquida de Adsorción*, en sus varias modalidades ( por gravedad, por capa fina o HPLC de adsorción.); o bien por un gas, lo que origina la *Cromatografía de Gas de Adsorción*. En la cromatografía de absorción o partición, encontramos que la fase estacionaria pertenece a un líquido, y que la móvil puede ser un líquido (cromatografía HPLC de partición), o un gas (cromatografía de gas de absorción). En la *cromatografía de cambio iónico*, se produce un intercambio de iones, de acuerdo con las afinidades de las cargas. En la *cromatografía de exclusión molecular*, la separación se lleva a cabo en base al tamaño de las moléculas. Se antepone un tamiz muy fino, que hace que lleguen primero las moléculas grandes y después las más pequeñas. En la actualidad se ha procedido a estrechar el diámetro del tubo de análisis y a inyectar presión; de aquí, las siglas HPLC (High Pressure Liquid Chromatography).

Las similitudes de esta técnicas con los procesos fotográficos saltan a relucir con facilidad. De hecho, el término cromatograma fue propuesto en un principio por la semejanza que presentan las franjas resultantes de la depuración con las líneas de emisión y absorción de los espectrogramas<sup>42</sup>. Se barajan también términos muy similares a los utilizados en óptica, como el poder de resolución, que, en este caso,



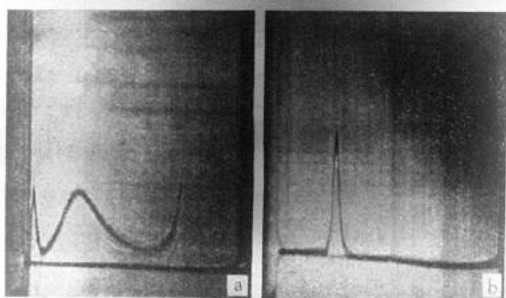


Fig. 5.8. Fotografías de patrones de ultracentrifugado. 1961.

se corresponde con los picos que podemos representar en el gráfico, relativos al número de sustancias que pueden ser identificadas. Esta es la razón por la que, en ocasiones, la *cromatografía líquida de alta presión* (HPLC), se suele denominar de *alta resolución* (High Resolution Liquid Chromatography). Y tal como sucede en la resolución óptica, hay que llegar también a un punto de compromiso entre las variables que intervienen, en esta caso, entre el tamaño de las partículas que se utilizan como tamiz, y la presión que se ejerce para iniciar y mantener la fase móvil. La

*cromatografía de capa fina* es la que más recuerda al proceso fotográfico, pues se trata de una placa de metal con una capa fina adherida que sirve de fase estacionaria. Esta se impregna con la sustancia, y sube por un proceso de capilarización que da lugar a la formación de la imagen o patrón. Posteriormente, se *revela* mediante tintes o calor, siguiendo un proceso simple y rápido. Se puede hacer también en una o dos dimensiones, tan sólo con voltear la placa 90°, e iniciando de nuevo el proceso de separación. Por último, la incorporación de las técnicas autorradiográficas, en las que son añadidos a las muestras componentes radiactivos a fin de hacer visibles ciertos elementos que a simple vista pasan inadvertidos, ha añadido un nuevo punto de conexión entre ambas técnicas. En este caso, se suelen colocar tiras cromatográficas, ya reveladas con este tipo de componentes, en contacto con película de rayos X durante intervalos de tiempo que pueden llegar hasta días<sup>43</sup>.

A partir de la aparición de la *cromatografía de gas*, el análisis de moléculas por cromatografía se lleva a cabo en una escala microscópica. En este sentido, la aparición de los ordenadores, o de la tecnología de generación de pulsos, ha sido decisiva. Se ha conseguido más precisión en la medición de tiempos, con picos gaussianos que se pueden cuantificar e integrar con gran exactitud. Lejos quedan

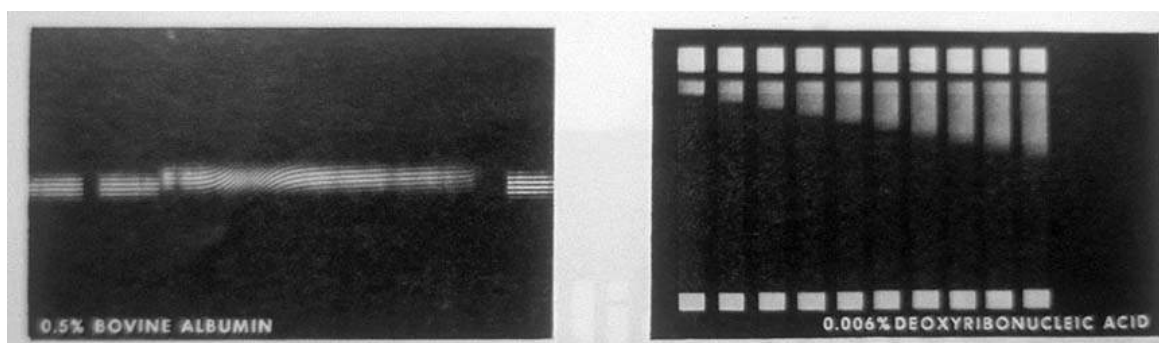


Fig. 5.9. Ultracentrifugado 1. Izq. Franjas de interferencia Rayleigh para el análisis celular de la albúmina bovina. Ofrece el peso molecular, la velocidad de sedimentación, etc. Dcha: Absorción UV, para el análisis de nucleoproteínas. 1955.

los días en que estas mediciones se hacían con planímetros, o incluso pesando el papel recortado correspondiente a los picos formados. En la actualidad, el control del empuje o presión se lleva a cabo mediante la temperatura, al ser utilizados gases inertes que no reaccionan con las sustancias de estudio. Como se dijo anteriormente, la espectrometría de masas completa el análisis cromatográfico, añadiendo al eje de coordenadas, formado por la intensidad y el tiempo, un tercer eje que corresponde a la variable  $m/z$ , o relación masa / carga.



Finalmente, otra técnica de separación de compuestos muy próxima a la electroforesis y a la cromatografía, es la de *ultracentrifugado*. En este caso, encontramos también resultados que son presentados de forma visual, y en los que la fotografía desempeña un papel destacado. Básicamente, consiste en colocar las muestras de compuestos en el interior de recipientes que son sometidos a altas velocidades y a distintas temperaturas. Las diferentes sustancias o moléculas se hacen patentes por medio de los distintos niveles de sedimentación que presentan, conforme a sus pesos atómicos, tal como suelen recoger las placas fotográficas (Figura 5.8.). Es una técnica que comenzó a ser utilizada también de forma masiva a partir de la segunda guerra mundial, mayormente en la separación de prótidos (albúminas, globulinas, virus, etc), y en identificación de ácidos nucleicos. (Figura 5.9.).

## 5.4. La conquista del espectro

*Nunca puedes obtener algo a cambio de nada, ni siquiera una observación.*<sup>44</sup>

Dennis Gabor

La luz en el transcurso del siglo XIX fue convirtiéndose en la gran protagonista de la ciencia. No sólo por haber sido un elemento decisivo en el desarrollo de la fotoquímica y en el descubrimiento de la fotografía, sino porque el estudio de su comportamiento terminó por representar un eje indiscutible en la investigación y condicionar el curso de numerosas ramas científicas. Los ensayos para averiguar su velocidad, su acción sobre los diversos tipos de materiales, su relación con los fenómenos eléctricos, o su manera de propagarse a través de los sistemas ópticos, como prismas, espejos o lentes, contribuyeron a que fuera catalogada como el fenómeno estrella de los estudios científicos. El espacio y el tiempo se relativizaron, al tiempo que la luz se convertía en el marco de referencia indiscutible e invariable sobre el que edificar las nuevas teorías de la física. La luz, en todas su manifestaciones, pasó asimismo a ser parte fundamental de la instrumentación científica; especialmente, a través de su fenómenos más característicos, como la reflexión, refracción, transmisión, polarización, difracción e interferencia, efecto moiré, dispersión ... fenómenos que supieron aprovecharse para la construcción de numerosos instrumentos, tales como el reflectómetro, el refractómetro, los filtros de diversa índole, el polarímetro, el difractómetro, el interferómetro, el espectrómetro, o la propia la cámara fotográfica. La culminación de este proceso se logró cuando gran parte de ellos fueron acoplados al telescopio y al microscopio, potenciando la observación a cotas inimaginables hasta entonces.

Las posibilidades no se agotaron aquí, pues los fenómenos de la luz se expandieron hacia otro tipo de manifestaciones visibles como la *luminiscencia*, que engloba una serie de fenómenos luminosos muy próximos a los fotoeléctricos, compartiendo sus bases interpretativas. El término luminiscencia fue sugerido por E. Wiedemann en 1895, para englobar el conjunto de formas con que ciertos materiales emiten luz por la acción de estímulos eléctricos, mecánicos, químicos o luminosos; con la excepción del calor, cuyo efecto luminoso recibió el nombre de *termo- luminiscencia*. Siguiendo este patrón, se fijaron los términos de *electroluminiscencia* o emisión de luz como resultado de la acción de los rayos catódicos, rayos X, radiaciones radioactivas, o rayos canal; de tribo- luminiscencia, por la fricción o el choque que se produce entre los cuerpos; de *quimio-*

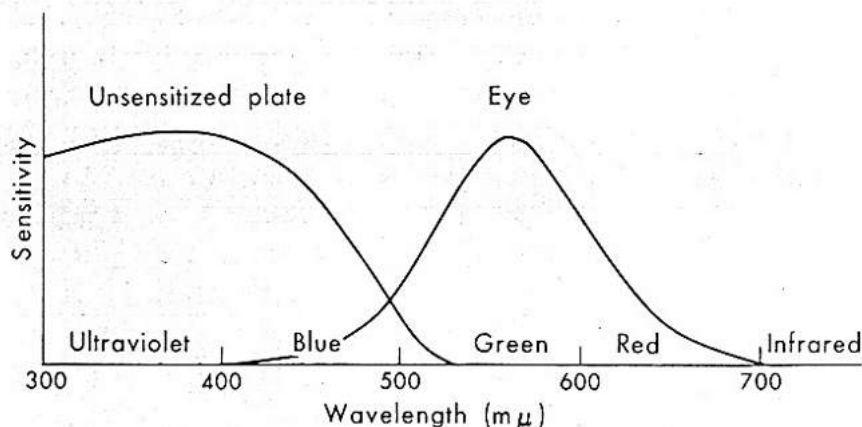
*luminiscencia*, debido a las reacciones químicas, y de *foto- luminiscencia*, causado por la acción de la propia luz. Posteriormente, se hizo una clasificación adicional dentro de este tipo de fenómenos para establecer una diferencia entre aquellos en los que la emisión de luz se produce exclusivamente cuando el estímulo está presente, recibiendo el nombre de fluorescencia; y aquellos otros, en los que la emisión perdura aún cuando el estímulo ha cesado, denominándose *fosforescencia*. El conjunto de todos ellos ha desempeñado un papel de primer orden en el ámbito de la producción de imágenes, especialmente en fotomicrografía, y en técnicas electrónicas, como la televisión.<sup>45</sup>

A su vez, la luz comenzó a ser abordada con una mayor amplitud de miras, al tomarse en consideración las manifestaciones de la energía radiante más allá de la franja visible del espectro, denominada entonces luz invisible. El descubrimiento de los rayos X, de las emanaciones de los elementos radiactivos, de los rayos cósmicos, del ultravioleta y el infrarrojo, de los fenómenos de la radioemisión, e incluso de los múltiples fenómenos originados por las vibraciones mecánicas del sonido, amplió la perspectiva conceptual que se tenía de la luz, en consonancia con la fijación del espectro electromagnético, tal como lo conocemos hoy día<sup>46</sup>. Las múltiples combinaciones que pueden darse entre estos dos parámetros, relativos a los múltiples fenómenos que presenta la luz (reflexión, polarización, difracción, etc.) y al amplio abanico de radiaciones que presenta el espectro electromagnético, nos da una idea de la gran cantidad de técnicas e instrumentos de observación y medición que pueden construirse. No está de más insistir en el papel decisivo que la fotografía desempeñó tanto en la detección, análisis y fijación del conjunto de radiaciones que componen este vastísimo espectro, como en la formación de tantos e importantes instrumentos.

En el proceso de captación de la luz, sabemos que la fotografía de las sales de plata y el ojo humano quedan limitados a franjas muy concretas del espectro. Se suele afirmar que fueron los estudios de Newton sobre la dispersión y recombinación de los haces de luz por los prismas, el antecedente más directo de la estructuración del espectro electromagnético, tal como lo conocemos en la actualidad. Nunca observaciones tan simples tuvieron tanta trascendencia.

*Una vez que emergen del prisma, los rayos son desviados de diferente forma; el extremo del espectro perteneciente al rojo está formado por aquellos que sufren una desviación menor, y el extremo del violeta por los que se desvían más. Los extremos del espectro aparecen más borrosos que el medio, que adquiere su mayor brillo en el verde amarillo .<sup>47</sup>*

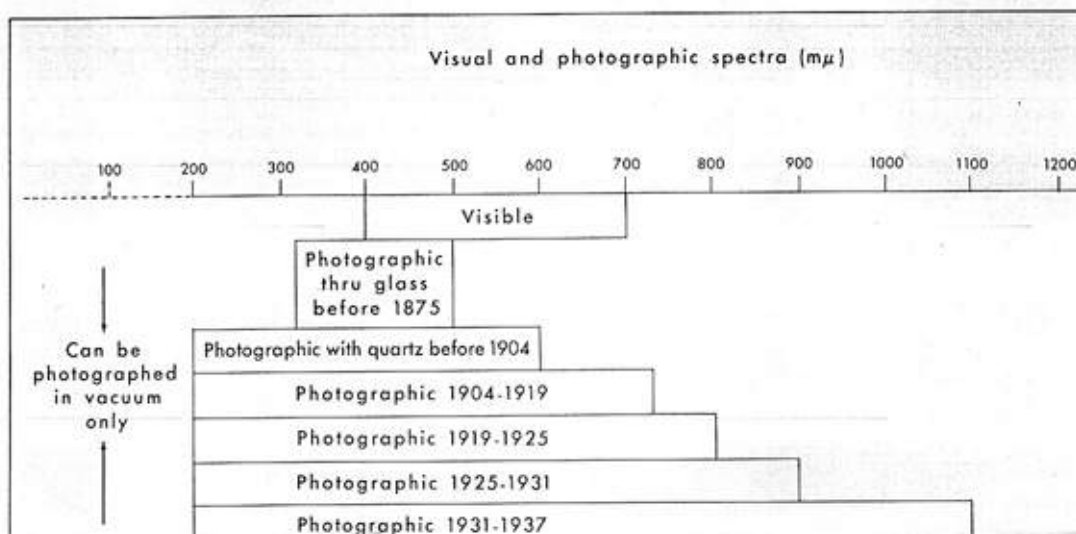
Originalmente, las primeras placas fotográficas no llegaron a cubrir siquiera el espectro visible, estando sujetas a la franja perteneciente al azul y el ultravioleta próximo (Cuadro nº 8)<sup>48</sup>. Fueron los tintes sensibilizadores, descubiertos por azar en 1873, por H. W. Vogel, los que hicieron posible ampliar la sensibilidad de las emulsiones al resto del espectro. Este científico se sorprendió en una ocasión al comprobar que un tinte amarillo que había esparcido sobre una placa de colodión, pretendidamente para evitar la formación de halo, redundaba en una mayor sensibilidad de la emulsión ante el color verde. A partir de este hallazgo simple, pero decisivo, comenzó a añadir otros tintes a las emulsiones, comprobando la absorción selectiva de cada uno de ellos ante la luz. El resultado de estas investigaciones pronto permitió ampliar la sensibilidad de las placas a la casi totalidad del espectro visible y a asentar uno de los caminos más firmes hacia la fotografía en color. (Cuadro nº 9)<sup>49</sup>.



*Cuadro n° 8. Sensibilidad del material fotográfico en sus orígenes y del ojo humano. Según Mees, C. E. Keneth. 1966.*

La cobertura total del espectro se llevó a cabo en 1904, gracias a la elaboración del pinacianol. En estos mismos años, se pudo extender el registro espectral hasta longitudes de onda de 200 armstrongs en la franja ultravioleta, gracias a la utilización de cristales de cuarzo incorporados a los sistemas ópticos. En 1919, se amplió de nuevo la sensibilidad, esta vez dentro de la franja del infrarrojo, gracias al descubrimiento de la kriptocianina. Y así, hasta llegar a 1952, año en el que se consiguió fabricar emulsiones sensibles a longitudes de onda que sobrepasaron los 13.000 Å en el espectro de los IR. Los límites de la fotografía de sales de plata para la captación de las radiaciones del espectro electromagnético hasta las fechas que comprende esta investigación, se sitúan cercanos a estos dos últimos valores, relativos al ultravioleta y al infrarrojo (200- 14.000 Å). Una vez que se sobrepasan estas dos cifras, en un sentido u otro, sólo se puede fotografiar con la ayuda de técnicas complementarias, tales como medios al vacío, o con dispositivos electrónicos de diversa índole, cuyos resultados visibles son susceptibles de ser registrados por soportes fotográficos. Los diversos tubos de imagen, el microscopio electrónico, los aceleradores de partículas, los rayos X, la cámara de niebla, la cámara de burbujas, las técnicas de radar, de radio, o el sónar, son ejemplos de ello.

#### SENSITIZING AND DESENSITIZING DYES



*Cuadro n°9. Evolución de la sensibilidad espectral de las emulsiones*

El descubrimiento de las radiaciones que se encuentran más allá del espectro visible, está íntimamente relacionado con la fotografía. Si el infrarrojo fue detectado, por primera vez, por William Herschel en 1800, con la ayuda de cristales de diferentes colores, tiras de papel ahumado y una serie de termómetros colocados en fila ( ver Figura 3.32.), fue su hijo John Herschel, el primero en ofrecer pruebas fehacientes de su existencia y de sus características más sobresalientes (*Efecto Herschel*) por medio de la fotografía<sup>50</sup>. Asimismo, el conocimiento del ultravioleta está íntimamente relacionado con los orígenes de la fotografía. Recordemos que fue J. W Ritter, quien detectó en 1801 este tipo de radiación, al comprobar el ennegrecimiento de las sales de plata, una vez que fueron expuestas a radiación de este tipo en el interior de una cámara oscura. Con el paso de los años, la técnica fotográfica fue depurándose para expandirse cada vez más en un sentido y otro del espectro.

#### 5.4.1. La fotografía ultravioleta y de fluorescencia.

En el estudio de la radiación ultravioleta, no se tardó en comprobar que el cristal de las lentes y la gelatina de las emulsiones absorben este tipo de radiación; específicamente, cuando se rebasa los 3.500 Å. Teniendo en cuenta que el espectro visible se encuentra entre los 4.000 y 8.000 Å, las lentes fotográficas dejan pasar por lo común una pequeña parte del espectro perteneciente al UV. Para la captación de radiaciones que se encuentran más allá de este límite, es necesario fabricar el cristal de las lentes con cuarzo, reducir al mínimo posible la presencia de la gelatina en las emulsiones, o añadir componentes fluorescentes a las muestras fotografiadas con luz UV.

En la franja UV es importante distinguir entre el UV cercano ( 4.000 a 3.500 Å) y el lejano (3.550 a 1400 Å). Por debajo de 2.000 Å, la gelatina absorbe este tipo de radiación, y por debajo de 1.800 Å lo hace el propio aire. Para fotografiar el UV más próximo se utiliza luz día, o luz artificial producida por lámparas de vapor de mercurio, de arco eléctrico, tubos fluorescentes o flash electrónico, siendo necesario emplear también un filtro que elimina la franja visible del espectro. Las emulsiones pueden ser las convencionales. Para el UV lejano, se debe emplear óptica de cristal de cuarzo, con lámparas de vapor de mercurio o de hidrógeno, aparte de un filtro especial que restringe la radiación a la franja deseada. La emulsión, en este caso, debe ser sensible al UV. En general, la diferencia básica que encontramos al utilizar un sistema u otro de fotografía ultravioleta, descansa en el uso de radiación reflejada o transmitida<sup>51</sup>, por lo demás, la técnica no se aleja de la fotográfica convencional. Las *pantallas UV* son los utensilios que se utilizan para lograr que la transmisión de luz, procedente de las lámparas que iluminan los objetos, se limite a este tipo de radiación. En este caso, la fotografía se hace de forma directa, en una sala oscura para evitar la presencia de otras fuentes de luz que contengan radiaciones no pertenecientes al UV. Por el contrario, el uso de *filtros UV*, emplazados entre el objeto y la cámara, permite la utilización de la luz directa, y procedente de las lámparas elegidas. En esta modalidad, los filtros son lo encargados de absorber la radiación que no pertenece al UV.

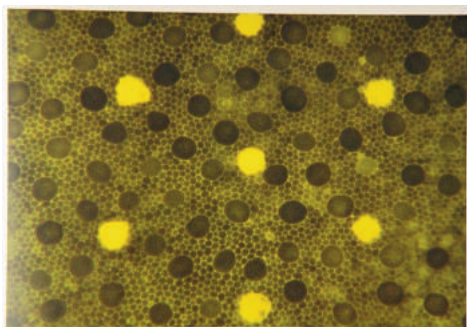
Muy ligada a la fotografía del espectro ultravioleta se encuentra la *fotografía fluorescente*. La fluorescencia, como vimos anteriormente, es una propiedad que algunos objetos tienen para convertir una radiación invisible, normalmente la UV, en luz visible; normalmente en forma de un resplandor que puede adoptar tonos desde el rojo al violeta. Este tipo de fotografía se puede considerar una extensión de la anterior, ya que se trata de fotografiar con luz UV objetos que contienen esa cualidad, bien de forma natural (*bioluminiscencia*), bien porque han sido tratados con alguna sustancia fluorescente. En este último caso, se trata de iluminar los



objetos con luz UV exclusivamente, con el uso de pantallas UV; y de fotografiar el objeto en la franja visible del espectro, por lo que es necesario el uso de un filtro en la cámara que absorba toda la radiación UV procedente del mismo. Los resultados de una y otra acción son, por tanto, opuestos, asemejándose a lo que entendemos como positivo y negativo de una fotografía. La radiación UV incidente es absorbida por los elementos fluorescentes del objeto, haciendo que las partes que se muestran más brillantes sean, en realidad, las más oscuras por absorber este tipo de radiación. Una mancha de grasa sobre un tejido, por ejemplo, que normalmente nos parece más oscura que el fondo, en una fotografía fluorescente, aparecería iluminada sobre el fondo oscuro.<sup>52</sup> La radiación UV se encarga, en líneas generales, de hacer visible las partes en las que están presentes las sustancias fluorescentes. Recordemos la película *El hombre invisible*, adaptación de la novela de H. G. Wells, en la que los vestidos del protagonista, embadurnados intensamente con sustancias fluorescentes, parecen caminar por sí solos suspendidos en el aire, gracias a la utilización de este tipo de fotografía.



*Fig. 5.10. Aparato fotomicrográfico para luz ultravioleta. h. 1920. Carl Zeiss.*



*Fig. 5.11. Fotomicrografía de fluorescencia de conos y bastones en la retina. E. M de Monasterio. 1996.*

Las aplicaciones científicas más extendidas de este tipo de fotografía, UV y fluorescente, es en el ámbito de la fotomicrografía de tejidos y células (Figura 5.10 y 5.11.), en la investigación criminalista, en la distinción de gemas auténticas, o en el estudio pericial de obras de arte. En este sentido, son bien conocidas sus propiedades para detectar determinadas sustancias en tejidos, en fluidos corporales, marcas en superficies, como huellas dactilares, etc. Mención especial debe hacerse de su aplicación en el campo de la cromatografía, en el que tanto la fotografía UV como fluorescente se llevan a cabo una vez que el proceso cromatográfico ha terminado,

normalmente para hacer visible elementos que a simple vista no son discernibles, o para fijar y almacenar resultados inestables y perecederos, dado la fragilidad de cierto tipo de cromatogramas.<sup>53</sup>

Una variedad de la fotografía fluorescente es la conocida por *fluografía*. En este caso, se trata de rellenar con un producto fluorescente, normalmente en polvo o en forma de pasta de glicerina, los huecos o relieves que presenta un objeto. Posteriormente, se lleva a cabo un lavado superficial del objeto, por lo que los restos del producto utilizado se quedan en los pliegues y en las estrías del mismo. Una vez seco, se procede a iluminar el objeto en el interior de una cámara oscura con radiación UV filtrada, o con luz de Wood, lo que permite discernir sus rasgos más sobresalientes sobre un fondo negro. Este tipo de fotografía sigue el procedimiento habitual de la fotografía de fluorescencia. Su aplicación se da mayormente en museos, para el estudio de tallas, huesos y moldes grabados, que a simple vista pasan inadvertidos.<sup>54</sup> Por último, es importante recordar la utilización de la franja del espectro UV en la espectrografía, aplicación que comenzó a ser utilizada tan pronto como las placas se sensibilizaron a longitudes de onda de hasta 2.110 Å, preferentemente para el estudio astronómico.

### 5.4.2. La fotografía de infrarrojos y la termografía

En sentido contrario, una vez que sobrepasamos la franja perteneciente al color rojo de la luz visible, encontramos el infrarrojo. Si el UV es absorbido por la gelatina y el cristal de las lentes, el IR lo es por el vapor de agua. Desde tiempos inmemoriales, la luz ha sido asociada al fenómeno del calor, normalmente producido por el fuego o por el sol. Recordemos cómo la detección del infrarrojo por William Herschel, se produjo con la ayuda de termómetros que registraron el ascenso del calor por encima de la luz roja visible. Ampere fue el primero en señalar la identidad de ambas radiaciones en 1835<sup>55</sup>; y John Herschel en comprobar el efecto que lleva su nombre, consistente en la capacidad que tienen la luz roja y la infrarroja para blanquear una imagen latente presente en una placa fotográfica, que curiosamente es insensible a este tipo de color. Los efectos fotográficos del IR comienzan a producirse a partir de los 7.600 Å, límite superior del color rojo profundo, y se extienden hasta las 3.000 mμ (milimicras), justo por encima de las radiaciones de las microondas. La radiación térmica es parte de esta franja espectral, lo que da lugar a las técnicas de imagen termográficas, que quedan comprendidas entre las 3 y las 1.000 mμ. La fotografía, por encima de los 20.000 Å, requiere la colaboración de técnicas electrónicas y físicas (fotocélulas, termopilas, radiómetros) para poder registrar sus efectos.

Existen dos métodos básicos de fotografiar en el espectro del infrarrojo: uno, sobre emulsiones sensibilizadas en esta franja del espectro, y otra, mediante técnicas que convierten la radiación infrarroja en radiación visible. En el primer caso, las emulsiones se sensibilizan con tintes del grupo de las cianinas, que son las que posibilitaron ampliar la capacidad espectral de la fotografía desde los primeros ensayos de Vögel a finales del XIX. Esta técnica se completa con la utilización de un filtro que absorbe la franja del azul y del violeta, y que limita la sensibilidad de la película al rojo y al IR. Las emulsiones fotográficas de IR, no obstante, son sensibles a esta franja del espectro y a determinadas partes del espectro visible (azul- violeta y rojo), por lo que es necesario la utilización de un filtro que absorba este tipo de radiación visible y transmita sólo la IR. Como en el caso de la fotografía UV, los objetos fotografiados con técnica de IR, pueden reflejar o transmitir distintas cantidades de radiación IR; o incluso pueden emitir luminiscencia de IR a partir de luz visible. Esto condiciona el uso y emplazamiento de pantallas y filtros de IR, dependiendo de qué efectos de la luz incidente sobre el objeto (reflexión, transmisión o emisión) quieren ser fotografiados. La exposición del material, lógicamente, requiere una adaptación, consistente en aumentar en



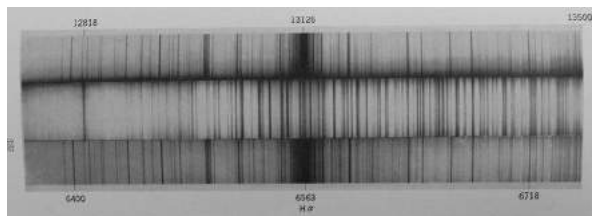
*Fig. 5.12. Fotografía de luz IR en total oscuridad. Walter Clark. 1931.*

tres o cuatro pasos la apertura de diafragma. La iluminación utilizada puede ser luz día, lámparas incandescentes de tungsteno, o flashes electrónicos.<sup>56</sup>

Desde sus principios, lo más llamativo de la técnica fotográfica de infrarrojos fue su capacidad para registrar escenas en completa oscuridad. Las primeras fotografías aparecidas en este sentido datan de 1930. En el observatorio de Mount Wilson se logró fotografiar en plena oscuridad un bodegón con diferentes objetos con el calor desprendido por unas estufas, y bañando las emulsiones en cianina.<sup>57</sup> En los años sucesivos, se hicieron fotografías de carácter experimental en los laboratorios de Eastman Kodak, donde debemos resaltar la de un grupo de personas sentadas a oscuras en un teatro, realizada exclusivamente con luz de lámparas de tungsteno, filtrada para emitir exclusivamente en IR (Figura 5.12.); o la de un busto escultórico, iluminado exclusivamente con la radiación emitida por un par de planchas domésticas (Figura 5.13.).



*Fig. 5.13. Fotografía con luz IR en total oscuridad aprovechando la radiación térmica de dos planchas eléctricas. Walter Clark. 1931.*

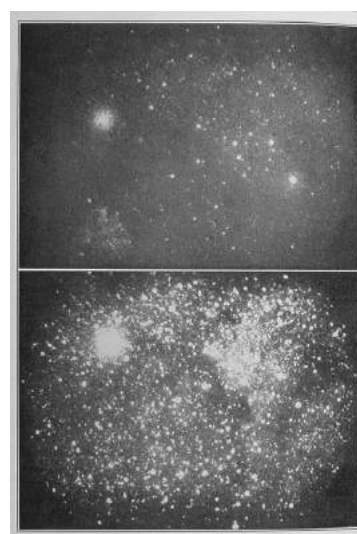


*Fig. 5.14. Fotografías en IR del espectro solar. La franja de en medio es la de primer orden entre 12.730 a 13.500 Å. Walter Clark. 1946.*

A partir de la década de los treinta, la fotografía de infrarrojos comenzó a ser aplicada en multitud de campos, destacando el de la espectrografía y de la fotografía astronómica, que ya contaba con una larga tradición en el estudio de los espectros emitidos por los objetos celestes. (Figura 5.14.). En 1935, comenzaron a realizarse en el observatorio de Mount Wilson espectrografías del espectro solar en la franja del IR, hasta el límite de los

13.500 Å; esto facilitó la catalogación de las líneas espectrales en longitudes de onda hasta entonces desconocidas, incluidas las de las franjas visibles y del UV. Igualmente, se comenzó a aplicar este nuevo tipo de espectrografía al estudio de diferentes planetas y estrellas, hecho que permitió el análisis de la composición de sus respectivas atmósferas (Figura 5.15.). Por otro lado, la fotografía de IR posibilitó la observación de estrellas hasta entonces inaccesibles al poder de resolución de los telescopios, como fue el caso de la *Epsilon Aurigae*, detectada por Otto Struve en 1938, tras una intensa labor fotográfica en este lado del espectro<sup>58</sup>.

Por lo demás, la fotografía de IR ha sido ampliamente utilizada en estudios de fotomicrografía, de fotografía aérea y de reconocimiento, ligada de forma especial a fines militares; también en la observación de los vasos sanguíneos a través de la piel, en enfermedades cutáneas, pupilografía, en la observación del comportamiento animal en ambientes de completa oscuridad, en botánica, preferentemente en el estudio de enfermedades de plantas debidas a despigmentaciones o cambio estructurales; en



*Fig. 5.15. La nebulosa Norte América con luz azul-violeta, e IR, respectivamente. h. 1946. Otto Struve.*





*Fig. 5.16. Fotografías pancromáticas y de IR de tipos raciales. C- G. Seliman, 1934.*

arqueología, paleontología, etc. Se suele aplicar asimismo en la detección de rasgos o trazos invisibles en documentos y obras de arte antiguos, en la comprobación de retoques efectuados con posterioridad, en análisis de tintes y sustancias en tejidos, etc. Siguiendo la tradición de la fotografía antropométrica y psicológica, muy en boga a finales del siglo XIX, han surgido estudios de cierta curiosidad en esta dirección, con empleo de la técnica de IR. Al igual que entonces, los resultados no han pasado de tener cierto interés o relevancia, exclusivamente desde un punto de vista experimental y fotográfico. (Figura 5.16)

Muy próxima a la fotografía de IR, se encuentra la termografía al compartir zonas comunes del espectro. A medida que vamos desplazándonos a lo largo del espectro del IR, los niveles de temperatura suben hasta llegar a un punto máximo, para luego volver a disminuir progresivamente. El hecho de que los procedimientos fotográficos convencionales para el IR no gozaran de suficiente sensibilidad para la captación del calor irradiado por los cuerpos de los seres vivos, por ser radiaciones situadas en el IR lejano, retrasó por un tiempo el desarrollo de técnicas termográficas fiables y de una resolución aceptable. La llegada de los primeros escáneres de IR, como el ideado en 1957 por R. N. Lawson, rompieron esta tendencia. El aparato estaba basado en detectores de IR electrónicos (fotocélulas o fototransistores), que llegaban a captar radiaciones IR del orden de 300.000 Å. También, se buscaron técnicas mixtas, fotográficas y de fluorescencia, como la del propio Lawson y L. L. Alt, consistente en esparcir un polvo fosforescente sobre la piel de los sujetos, e iluminándolos con luz UV. De esta forma, la piel quedaba iluminada de forma desigual de acuerdo con las zonas con mayor o menor presencia de calor.<sup>59</sup> Posteriormente, aparecieron las *cámaras de barrido por infrarrojos* (IR Scanning Camera), que conjugaron con maestría las prestaciones del sistema fotográfico convencional y de los tubos de imagen de la tecnología procedente de la televisión. Estas cámaras hicieron uso de un sistema de lentes por espejos, y de espejos móviles que se encargaban de *barrer* el objeto al modo de los tubos de imagen, a la vez que registraban los impulsos en una placa fotográfica.<sup>60</sup> El resultado era una imagen termo- fotográfica que suministraba información sobre la distribución espacial de los puntos de calor relativos al objeto y de las intensidades de temperatura por medio de los niveles de grises registrados. Estas cualidades convirtieron esta técnica en una herramienta de gran interés militar, industrial y médico, especialmente, en tareas de detección y reconocimiento de objetos y fenómenos asociados al calor. El hecho de que cualquier objeto de la naturaleza pueda exhibir, en mayor o menor medida, procesos termográficos, por ser ésta una propiedad inherente a todo lo existente, nos obliga a expandir el concepto de imagen termográfica a límites insospechados, tales como a los efectos producidos por el sol o por una explosión nuclear en la piel humana o en cualquier otro tipo de material. (Figuras 5.17.)

*Los efectos físicos más importantes de las altas temperaturas debido a la absorción de radiación térmica son, desde luego, la ignición o carbonización de material combustible, y las quemaduras de piel.<sup>61</sup>*

El término termografía se debe a Robert Hunt, quien eligió este nombre para bautizar en 1840 un procedimiento fotográfico que procuraba copias directamente



en positivo, en base a la utilización de una fuente de iluminación muy intensa y constante, o incluso calor, en el momento del revelado de las placas<sup>62</sup>. Estos experimentos coincidieron con los que realizaron en esta misma dirección el propio Talbot y Niepce de Saint Victor. El procedimiento básico que se mantiene hasta nuestros días, consiste en utilizar un tipo de imagen que sea absorbente del IR, partiendo del principio básico de que cualquier objeto por encima del cero absoluto es susceptible de irradiar calor, y aplicar una fuente de calor a la misma por un cierto periodo de tiempo. Una vez que la imagen ha absorbido el calor de forma discriminada con respecto al fondo, se pone en contacto con algún material que sea sensible a esta diferencia de temperatura, hecho que se evidencia al derretirse o descomponerse alguna de sus partes; o incluso, al hervir alguno de sus compuestos. Estos procedimientos físicos y químicos se suelen acompañar del uso de sustancias como tintes en polvo, materiales polímeros termoplásticos, aceites, reactivos, o elementos químicos que reaccionan ante la presencia exclusiva de determinados grados de temperatura. También se dan los procesos por transferencia, en los que la superficie calentada se pone en contacto con otra similar, destinada a ser la copia; esto permite hacer múltiples reproducciones al modo de los procesos reprográficos que hacen uso de técnicas fotolitográficas, o de los actuales métodos de fotocopiado.



*Fig. 5.17. Marca del quimono en la piel por efecto de la radiación térmica, producida por explosión nuclear. Hiroshima. 1945.*

En la actualidad, el espectro IR y térmico queda dividido en cuatro franjas bien delimitadas: a) IR cercano (750- 3.000 nm); b) IR intermedio (3.000- 25.000 nm); c) IR lejano (25- 300  $\mu\text{m}$ ), y d) IR extremo (300- 3.000  $\mu\text{m}$ )<sup>63</sup>. Los sistemas termográficos y de IR han recibido en nuestros días un fuerte impulso por la demanda del sector militar de técnicas de reconocimiento de imágenes aéreas, de la industria de los circuitos integrados para el control de calidad y de los procesos ligados a la fabricación de componentes electrónicos, y de la botánica aplicada en el sector agrícola, para la detección y análisis de determinados compuestos en plantas, árboles o cereales.

Mención especial, merecen las *técnicas pirométricas*, destinadas a la medición de las temperaturas de los cuerpos calientes en este caso, por medio del estudio del comportamiento de este tipo de radiación en el material fotográfico. A principios del siglo XX, y por influencia de la recién formulada teoría cuántica, se produjeron una serie de experimentos en los que la fotografía se aplicó para determinar la temperatura de distintas fuentes térmicas. En 1912 aparecieron los primeros pirómetros, y en la década de los treinta, la fotografía comenzó a ser utilizada en este sentido.<sup>64</sup> Pero es a partir del final de la segunda guerra mundial, cuando se utilizan pirómetros fotográficos de forma intensiva, especialmente para la medición de temperaturas en las cámaras de combustión de cohetes, y en otros dispositivos ligados a la tecnología e investigación aeroespaciales. Las cámaras K- 24, equipadas con película XX de Kodak, fueron ampliamente utilizadas para determinar las temperaturas de distintas superficies sometidas a calor, mediante el análisis de los niveles densitométricos de las emulsiones. En años posteriores, se utilizó película infrarroja para los mismos propósitos. Los estudios pirométricos por medios fotográficos han estado en todo momento estrechamente ligados al estudio de temperaturas de objetos en movimiento, sujetos a altas velocidades, y a altos índices de calentamiento por rozamiento; tal es el caso de ensayos de balística. Con el paso de los años, la tendencia general en este campo, ha sido la confluencia de las técnicas fotográficas con las fotoeléctricas, mediante el uso

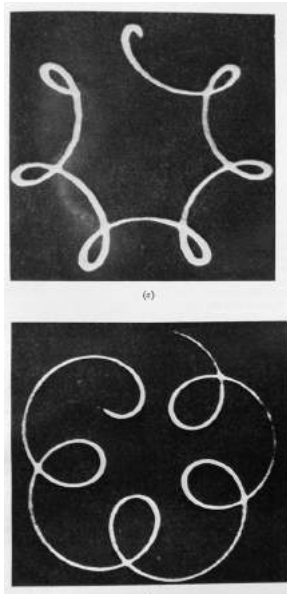
combinado de emulsiones fotográficas con disparadores electrónicos, sistemas de visionado y de representación de los fenómenos y de los datos numéricos por medio de impresoras y escáneres asociados a ordenadores, pantallas de TV, oscilógrafos, o vídeo.

Tal como será analizado en capítulos posteriores, dedicados a la fotometría y espectrometría basadas en dispositivos electrónicos, el estudio de las diversas radiaciones presentes en el espectro electromagnético experimentó un gran avance a partir de la llegada de este tipo de instrumentación, mucho más sensible y precisa que las técnicas fotográficas convencionales. Sin embargo, un periodo de transición quedó abierto a lo largo del siglo XX, en el que ambas tecnologías convivieron juntas, dando lugar a una serie de instrumentos híbridos de gran ayuda para la ciencia. En este sentido, es digno de resaltar todo el abanico de técnicas mixtas surgidas en el seno de la tecnología radio, con la creación de una instrumentación de la importancia de los telescopios radioastronómicos, el radar, o el sónar (ver cap. 6.1.1.), permitiendo que las técnicas de observación en ciencia lograran cubrir la práctica totalidad del espectro electromagnético. En líneas generales, se puede afirmar que en este largo periodo transitorio, los sistemas fotográficos convencionales se caracterizaron por aportar mayores niveles de resolución a las imágenes, mientras que las técnicas electrónicas se especializaron en tareas de detección de intensidades lumínicas y radiantes de valores mínimos, y en el análisis fragmentado de los fenómenos observados en el tiempo, dado su mayor sensibilidad y adecuación a este tipo de operaciones. La llegada de los sensores de estado sólido y de los ordenadores marcó el inicio de un nuevo periodo en el que las técnicas fotográficas de las sales de plata comenzó a ser paulatinamente desplazada en favor de las técnicas íntegramente electrónicas.

### 5.4.3. *El láser*

Para completar esta visión de las diferentes radiaciones que conforman el espectro electromagnético desde el punto de vista de la instrumentación científica de observación y producción de imágenes, mención aparte merece la tecnología láser y la holografía<sup>65</sup>. El descubrimiento del *máser* (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en el espectro de las microondas en 1954, por C. H. Townes; J. P. Gordon, y H. J. Zeiger, en Estados Unidos, y por N. G. Basov y A. M. Prokhorov en la Unión Soviética, en consonancia con las predicciones de Einstein al respecto unos años antes, sirvió para despertar el interés de los científicos por trasladar este hallazgo al espectro visible. Esta idea culminó con la concepción del láser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1958, por el mismo Townes y por A. L. Shalov. A nivel práctico, el proyecto quedó finalmente materializado con la construcción en 1960 del primer láser de rubí, por Th. A. Maiman.

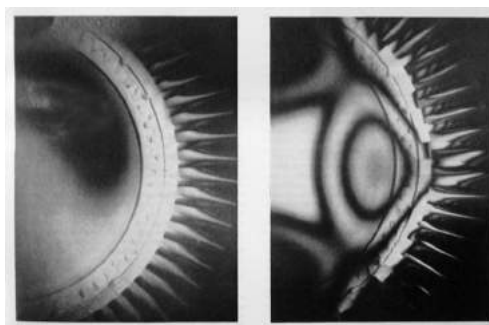
La luz láser se sitúa dentro del espectro visible, y se caracteriza por su brillo intenso, su unidireccionalidad (colimación), su coherencia y su monocromatismo. Existen diferentes tipos de láser, desde los primeros que se consiguieron con destellos producidos en cristales de rubí, a los producidos en medios líquidos y gaseosos, como los de gas xenon, o los que procuran ciertos materiales semiconductores. El procedimiento para conseguir la radiación láser es por medio de la excitación de los átomos, concretamente de los electrones que giran a su alrededor. Con esta acción se consigue un cambio de órbita de algunos de ellos, dando lugar a la emisión (estimulada) de una radiación o luz. Los fotones en este tipo de luz presentan propiedades idénticas en cuanto a su frecuencia, fase, dirección y polarización.



**Fig. 5.18.**  
*Trazo de un  
láser del  
movimiento  
de un giro  
del asta de  
un motor,  
en una  
película  
Plus X,  
1970.*

Lo más destacable de esta nueva fuente de luz es su capacidad para convertir, de una forma muy eficiente, energía eléctrica en luminancia, al tiempo que está limitada para convertir este tipo de energía en luz de gran potencia.<sup>66</sup> Esta doble característica afecta de forma directa al modo en que puede ser aplicada a los sistemas fotosensibles de creación de imágenes. Su monocromatismo, por ejemplo, condiciona su uso a un reducido de longitudes de onda, por lo que el material fotosensible debe ser seleccionado de acuerdo con esta capacidad, que varía dependiendo del tipo de láser. De otro lado, su naturaleza coherente se traduce en un tipo de foco intenso y sujeto a un punto muy delimitado del objeto, hecho que favorece un uso casi exclusivo a modo de escáner. Por otro lado, los láseres permiten hacer exposiciones sobre material fotosensible del orden de nanosegundos y

picosegundos, por lo que son una herramienta óptima para el análisis y observación de los fenómenos ultrafugaces en el tiempo, tal como ocurre con la fotografía de alta velocidad (Figura 5.18). En la actualidad, la imagen técnica en su conjunto se ha beneficiado ampliamente de la llegada de esta tecnología, especialmente, los sistemas de impresión más avanzados. Ejemplos de ello son las impresoras de tambor para material fotosensible de sales de plata, que reproducen en color y blanco y negro, así como el conjunto de escáneres, máquinas de fotocomposición, cámaras electrónicas, grabadoras de planchas de impresión que hacen uso tanto de los materiales convencionales de sales de plata y electrofotográficos, como de materiales fotopolímeros y diazo, de radicales libres, o térmicos en combinación con técnicas de IR<sup>67</sup>. (Ver cap. 5.4.) Todo ello, sin desestimar las amplias posibilidades que tienen estos rayos como fuente de señales en el campo de las telecomunicaciones por fibra óptica, o como herramienta de acción térmica y mecánica, lo que le proporciona un ilimitado número de aplicaciones en campos tan diversos como la medicina, la industria metalúrgica, y de circuitos integrados, o el militar, donde fueron bautizados en su día como *rayo de la muerte*.<sup>68</sup>



**Fig. 5.19** *Holografía de una turbina con  
sus cuchillas vibrando a 3.56 y 4.6 KHz  
respect. 1970.*

#### **5.4.4. La holografía**

Por su parte, la holografía fue propuesta por Dennis Gabor en 1947, en un intento por mejorar la resolución del microscopio electrónico. Esta es la razón por la que fue denominado en su día *microscopio electrónico de interferencia*<sup>69</sup>. En la concepción de este nuevo sistema de creación de imágenes, la fotografía desempeñó un papel de primer orden, por ser un elemento indispensable en la producción de hologramas y por permitir la realización de fotografías de las holografías resultantes con tan sólo elegir distintos puntos de vista o atender a

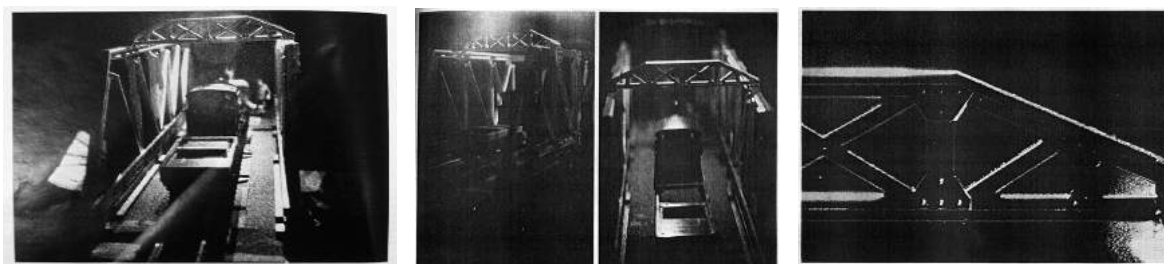




**Fig. 5. 20. Fotografías de un patrón de interferencia; al completo, y en distintos focos. 1971.**

ciertos detalles. Como es sabido, la característica más sobresaliente del método holográfico es su capacidad para generar imágenes virtuales de tres dimensiones. Si la fotografía, por sí misma, es sólo capaz de registrar la amplitud o intensidad de las ondas luminosas correspondientes a un objeto, en la holografía

cabe la posibilidad de reproducir la fase de las ondas, hecho que proporciona una visión tridimensional de los mismos (Figura 5.19.). Como he adelantado anteriormente, una vez obtenida una holografía, podemos hacer nuevamente uso de la fotografía para plasmar elementos y fenómenos que están presentes en esa imagen virtual. De este modo, es posible registrar distintos objetos en distintos planos focales (Figura 5.20.), fotografiar de forma individual fragmentos de la imagen, o la propia imagen desde puntos de mira distintos (Figuras 5.21 a, b y c), o estudiar el comportamiento de un mismo objeto en el tiempo, siempre que la fotografía base del holograma se haya realizado con técnica de doble exposición (Figura 5. 22.), o mediante técnicas estroboscópicas cuyos resultados sean películas susceptibles de ser proyectadas a cámara lenta<sup>69</sup>.



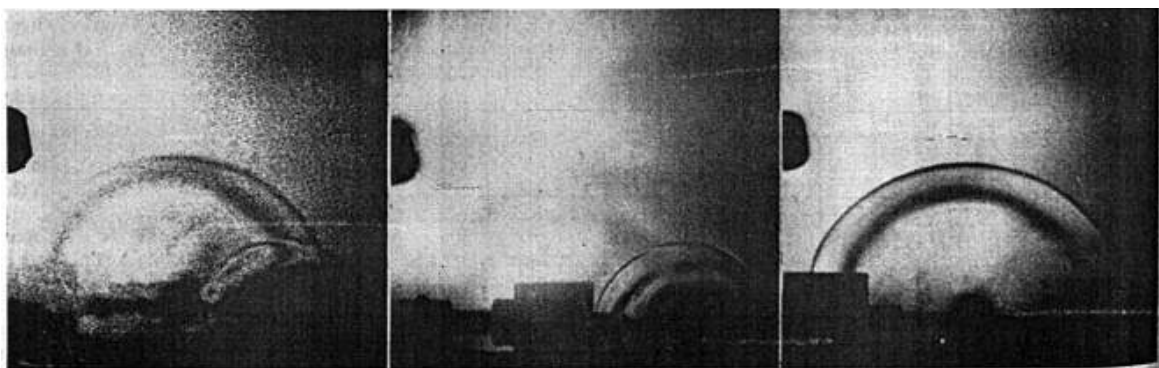
**Fig. 5. 21. a). Holograma. Punto de mira. b) Fotografía con diferentes puntos de vista de un mismo holograma. 1971. c). Fotografía de detalle de l holograma anterior.**

*Como la fase y la amplitud caracterizan la luz de forma completa, esto posibilita que toda la información relativa a un campo de luz pueda ser registrada. Esta forma especial de registro, conocida como holografía, efectivamente congela en el tiempo la distribución de la luz en un frente de onda.<sup>70</sup>*

La necesidad de utilizar en esta técnica una luz coherente frenó su desarrollo hasta la llegada del láser. La utilización de haces de electrones o de luz monocromática intensa y llevada a un foco extremo, tal como hizo Gabor en 1948 en sus primeras holografías, ofrecieron resultados muy pobres (Figura 5.23.). Por tanto, fueron más de doce años de espera para que la primeras holografías, *sensu strictu*, fueron apareciendo en el ámbito de la ciencia.

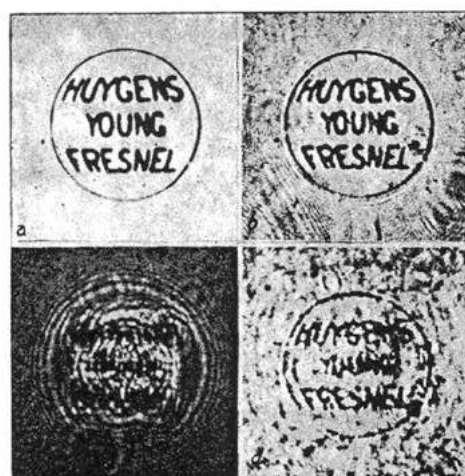
La producción de un holograma se lleva a cabo en su forma tradicional en tres fases: registro, procesamiento fotoquímico convencional y reconstrucción. En este proceso no hay dispositivos ópticos presentes, siendo su base el fenómeno de interferencia que un láser produce sobre un objeto, y su reconstrucción mediante





*Fig. 5.22. Diferentes fotografías de un holograma de una onda expansiva de aire. La primera al completo, y las otras dos en momentos distintos de la expansión. 1971.*

la recuperación de la información relativa a la fase de la onda. Se ilumina un objeto con un láser, y su reflejo es captado por una placa fotográfica. Al mismo tiempo, se registra un haz, también de ese mismo láser, pero que no ha incidido sobre el objeto. Posteriormente, la placa fotográfica se revela por procedimientos convencionales. Preferiblemente, debe ser una emulsión lo más rápida y de la mejor resolución posible, algo contradictorio pero deseable. Por último, la imagen virtual propia del holograma se produce al ser iluminada la fotografía con el haz de referencia utilizado. Posteriormente, se ideó otro procedimiento consistente en utilizar láminas semi- transparentes que permiten el paso de la mitad del láser directamente hacia la placa, y la otra mitad hacia al objeto, a fin de que sea reflejada por el mismo. Hoy día se utiliza la técnica de los materiales fotorrefractivos, materiales que permiten el cambio del índice de refracción de los mismos dependiendo del tipo de luz. Con esta técnica se consigue la producción de hologramas de forma instantánea y continua. La formación de hologramas se utiliza hoy día para el almacenamiento de información, tanto de imágenes como de datos. La transformación de señales analógicas en digitales, tan común hoy día, puede llevarse a cabo también, y de forma automática, con este tipo de procedimiento. Memoria y seguridad son dos temas de suma importancia donde la holografía está siendo aplicada por la industria del momento. Tan pronto como en 1965, el mismo Gabor señaló esta posibilidad, al comprobar la capacidad de la holografía para recomponer un conjunto de elementos a partir de otros, tal como sucede con los dos frentes de onda utilizados en la producción de hologramas.



*Fig. 5.23. Primeras holografías hechas con luz monocromática. 1948.*

*La reconstrucción de frentes de ondas contiene un principio que no ha sido lo suficientemente explotado. Dicho de una forma general: dos ondas coherentes son obligadas a incidir de forma simultánea sobre una placa fotográfica; una procedente de un objeto A; y la otra, de un objeto B. La fotografía las une de tal manera, que si el holograma es iluminado por A solamente B aparecerá; y viceversa. Hasta el momento, este principio ha sido aplicado de forma que A es el objeto de interés, y B la fuente de luz*

*Propongo ahora, darle la vuelta al asunto. Digamos que A es un signo, tal como una letra impresa a máquina o a mano, o un número que puede ser leído por cualquier sujeto, pero no por una máquina; y digamos que B es la combinación de una serie de puntos que forman un código de palabra que puede ser leído por una máquina. Ahora, producimos el holograma con la combinación de A con B. Cuando A, o un signo lo suficientemente parecido, se presente al holograma con la iluminación original, el código de palabra B parpadeará. Esto significa que el holograma puede servir de traductor, o como dispositivo de codificación.<sup>71</sup>*

Al hilo de estas ideas, surgieron propuestas encaminadas a aplicar el funcionamiento y los conceptos básicos de la holografía a multitud de fenómenos, incluido la memoria visual humana<sup>72</sup>, los mecanismos de asociación mental, tal como hizo el propio Gabor<sup>73</sup>, o a patrones de conducta tan intrincados como los de la violencia humana<sup>74</sup>. Si en el comportamiento de ciertos animales y en diversos mecanismos de emisión y recepción de señales acústicas, tal como ocurre con los murciélagos, los principios holográficos son extremadamente sugerentes<sup>75</sup>, en el caso de fenómenos complejos pertenecientes a un ser tan dependiente de lo social como el ser humano, propuestas de este tipo han quedado confinadas a un plano exclusivamente experimental.

## **5.5. Hacia una nueva espectrografía**

Probablemente no existe en la ciencia una técnica instrumental de mayor versatilidad y aplicabilidad que la espectroscopía. En capítulos anteriores (ver cap. 3.9.1; y cap. 5.6.) hemos asistido al proceso de su formación en dos modalidades fundamentales: la espectrografía de masas y la espectroscopía tradicional, hoy día denominada *óptica*, y ligada al estudio de las radiaciones visibles, y del UV e IR cercanos. A medida que la ciencia fue expandiendo su objeto de estudio a otros tipos de radiaciones más allá de esta región espectral, la espectroscopía fue creciendo en mayores posibilidades. No es fortuito que esta expansión se haya producido a la par que los métodos fotográficos han logrado registrar radiaciones allende esos mismos límites. Recordemos que la sensibilidad fotográfica nació sujeta a una mínima franja del espectro visible, y que fue extendiéndose hacia un lado y otro del mismo hasta abarcar la porción comprendida entre los 2.000 y 14.000 Å aproximadamente, que es el intervalo en el que la espectrografía óptica ha estado dedicada tradicionalmente. Posteriormente, el descubrimiento de los fenómenos radiactivos, los rayos X, el láser, las emisiones de radio y los fenómenos de resonancia, ampliaron sustancialmente el abanico de posibilidades, tanto de la fotografía como de la espectrografía. Si tenemos en cuenta que la espectroscopía puede hacer uso de múltiples parámetros físicos para la configuración de cada una de sus formas, podremos comprender la gran cantidad de técnicas espectroscópicas que pueden darse como resultado de las combinaciones posibles entre estas variables. Para entender la verdadera magnitud de esta técnica, tan sólo hay que tener presente que, entre otras cosas, tiene la capacidad de utilizar la mayor parte de las radiaciones electromagnéticas existentes, de emplear los fenómenos de emisión, absorción y luminiscencia de estas posibles fuentes de radiación, fácilmente extensibles a la polarización, la dispersión o la refracción; que cuenta con la posibilidad de utilizar prismas, espejos, o rejillas de difracción como medios de producción de las líneas y bandas espectrales; y que sus aplicaciones pueden estar dirigidas al análisis de lo remoto, del mundo microscópico y de los fenómenos producidos en fracciones diminutas

de tiempo. Si miramos hacia atrás y observamos el avance experimentado por la ciencia a raíz de la formulación de las teorías cuántica y relativista, debido en gran medida a la aplicación de la espectroscopía óptica, podemos hacernos una idea del tremendo impacto que el resto de técnicas espectroscópicas desarrolladas a lo largo del siglo XX ha podido tener en la producción de conocimiento científico. Para los fines concretos de esta investigación, será por tanto esclarecedor dilucidar el papel que ha desempeñado la imagen técnica en su conjunto, como elemento integrador de esta herramienta; y analizar el proceso de cambio a raíz de la paulatina sustitución de los métodos fotográficos convencionales por los dispositivos y técnicas más allegados a la electrónica.

La espectroscopía, como tantas otras técnicas de observación y medida, se apoyó en un primer momento en el análisis directo y en vivo de las imágenes formadas en el espectroscopio por la dispersión de la luz a través de los prismas. Pero la fotografía entró sin demora en acción, aportando un modo de registro imprescindible para esta nueva técnica, y aumentando sustancialmente las posibilidades de análisis. En capítulos anteriores, salió a relucir cómo Bunsen y Kirchhoff fueron los encargados de llevar a cabo los primeros ensayos en esta dirección, y de establecer las primeras leyes físicas por las que se rige esta disciplina. A los pocos años, en 1868, A. J. Angström realizó estudios exhaustivos sobre la distribución de las diferentes longitudes de onda del espectro solar, creando la unidad de medida que lleva su nombre: el Angström (Å), equivalente a  $10^{-10}$  metros. La espectrografía como tal, o técnica de registro de estas franjas de luces y sombras sobre emulsiones fotográficas, permitió la identificación y medida de las líneas con gran precisión, y el estudio de las distintas densidades recogidas en la placa, aspectos determinantes que nos dan a conocer los elementos constitutivos de las muestras analizadas. Las primeras fotografías, fruto de los primeros espectrógrafos fabricados, fueron apareciendo a principios de la década de los ochenta del siglo XIX. En el campo de la astronomía, destacó el trabajo de W. N. Hartley; y en fotografía, los estudios que J. M. Eder realizó de los tintes que hicieron posible la expansión de la sensibilidad espectral de las emulsiones<sup>76</sup>. Pronto su campo de aplicación se extendió a numerosas áreas de la física y la química, destacando la espectroquímica, donde la identificación de elementos se hizo con una precisión muy por encima del análisis químico convencional, aún en cantidades muy pequeñas y a partir de muestras diminutas.<sup>77</sup>

La espectrografía, como herramienta de visualización y análisis, abarca tanto los procedimientos fotográficos clásicos como los puramente gráficos, que son los



Fig. 5.24. Espectroscopio de UV. 1927.



Fig. 5.25. Goniómetro y espectrómetro de rayos X, con placa fotográfica. 1935.

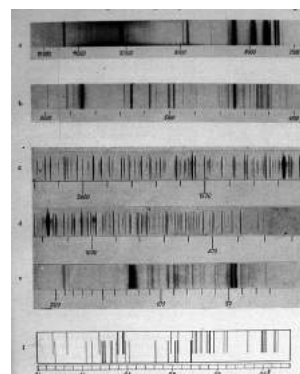


Fig. 5.26. Espectrografías de diferentes elementos: a) infrarrojo del sodio, potasio y rubidio. c) ultravioleta del carbono, etc. E. v. Angerer. 1952.



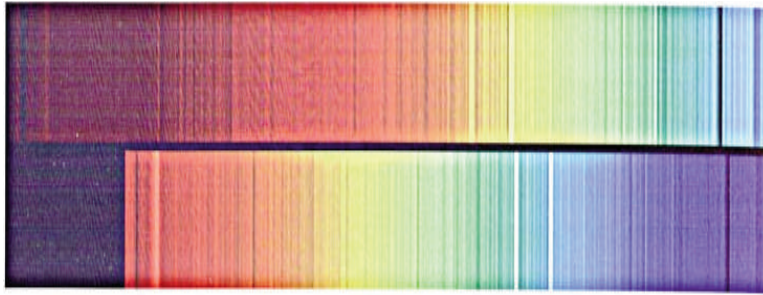


Fig. 5.27. Espectro. Desplazamiento hacia el rojo de una galaxia.

más extendidos en la actualidad. Mientras que en los primeros contamos con una imagen fotográfica en la forma de un patrón de densidades determinado, en consonancia con los elementos presentes en la muestra analizada; en los segundos, es esto mismo, pero con la

diferencia de que los valores relativos a las densidades vienen representados en un gráfico. En el método primigenio, la imagen fotográfica es un reflejo o sombra de un fenómeno físico muy concreto, que toma la apariencia de líneas y bandas producidas por la luz. Esta imagen es susceptible de ser analizada *a posteriori*, tanto cualitativa como cuantitativamente, con la ayuda de micrómetros y microdensitómetros fundamentalmente. En los segundos, la imagen desaparece en favor de un diagrama cartesiano, o de un gráfico tridimensional, facilitado por la nueva instrumentación fotoeléctrica y de cómputo. Entre un método y otro, tal como ocurre en fotometría, se produce un período de transición en el que ambas tecnologías coexisten, dando lugar a una instrumentación híbrida de gran repercusión en la ciencia del siglo XX. Esta coexistencia comienza a remitir con la llegada de los sensores de estado sólido, máximos responsables de que el proceso espectroscópico se realice en su integridad por dispositivos de naturaleza opto-electrónica.

No está de más en insistir en que la espectrografía fotográfica comenzó a expandirse hacia el análisis de fenómenos más allá del espectro visible gracias a que la propia fotografía fue conquistando zonas más alejadas en un sentido y otro del espectro (Figura 5.24; 5.25; y 5.26.). Esto originó una clasificación de la espectrografía en consonancia con el tipo de región espectral elegida para el análisis, dando lugar a tantas espectroscopías como zonas delimitadas del espectro electromagnético existen. Al mismo tiempo, surgió otra clasificación cruzada con la anterior, condicionada por el fenómeno de la luz utilizado en la producción de las imágenes. En su acepción original, se distinguieron dos fenómenos básicos: el de *emisión* y el de *absorción*. Los *espectros de emisión*, formados por la luz que atraviesa un medio, y que es recogida directamente por el espectrógrafo, presentan, a su vez, tres tipos de apariencia: *continuos*, en *líneas* y en *bandas*<sup>78</sup>. Los primeros aparecen como una figura continua que cambia de color progresivamente, dado que registran prácticamente todas las longitudes de onda relativas a la porción del espectro registrado (Figura 5.27). En general, se utilizan como ayuda para la espectrografía de absorción, y se producen en sólidos y líquidos llevados a la incandescencia, como metales fundidos, filamentos de lámparas, etc. Los de línea se forman a partir de la luz emitida por gases que han sido sometidos a la acción del calor o de descargas eléctricas; en estos casos, las líneas se producen en condiciones de laboratorio, al ser encerrados en tubos preparados al vacío, siendo cada una de las líneas la imagen de la ranura de difracción, producida por cada longitud de onda. Los espectros de banda representan emisiones de agrupaciones de moléculas en un gas luminoso, y se trata en realidad de líneas estrechamente agrupadas y de difícil



Fig. 5.28. Espectrografo con 100 pies de película de 35 mm. 1951.



resolución. Por su parte, los *espectros de absorción* se producen una vez que la luz ha sido absorbida en determinadas longitudes de onda por el objeto analizado, y a partir de que el resto de longitudes, que ha logrado pasar a través de él, produce el espectro. Si la sustancia absorbente es un gas se forma un *espectro de línea de absorción*, tal como ocurre con las líneas de Fraunhofer del espectro solar, que vienen determinadas por la absorción producida por la atmósfera solar de las radiaciones producidas por las zonas más internas del sol. Si el medio absorbente es un líquido o un sólido se producen *espectros de bandas de absorción*, formados por líneas difícilmente resueltas.



Fig. 5.29. Espectrómetro para el análisis de sustancias inorgánicas. 1927.

Para conseguirse esta variedad de opciones, con resultados que puedan ser fácilmente registrados por emulsiones fotográficas, es necesaria la intervención de una serie de elementos que se interponen entre la fuente de luz y la cámara, que son los que conforman la estructura básica de todo espectrógrafo (Figura 5.28.). En primer lugar, se dispone de una lente condensadora, que se encarga de concentrar y dirigir el haz luminoso hacia una ranura delgadísima que estrecha el haz a un mínimo; luego, se encuentra una lente colimadora que logra que el haz resultante sea paralelo, y, por último, un prisma o una rejilla de difracción, que puede producir hasta 20.000 líneas de separación por pulgada, encargándose de dispersar el haz en sus diferentes longitudes de onda, y de producir las diferentes bandas de colores y líneas espectrales, tal como son mostradas posteriormente por la placa (Figura 5.29.). Para el espectro visible sirven los prismas de cristal común, pero para las franjas UV y de IR son necesarios los de cuarzo, y los de germanio y sal de roca, respectivamente (Figura 5.30.). La dispersión se produce con mayor intensidad en las longitudes de onda más corta que en las largas. Los prismas se utilizan mayormente cuando la fuente de luz es débil, puesto que conservan mejor su intensidad, a diferencia de las rejillas de difracción que son más adecuados en los casos en que se requiere una mayor dispersión, una distribución de las líneas más constante y un mayor poder de resolución de la imagen.

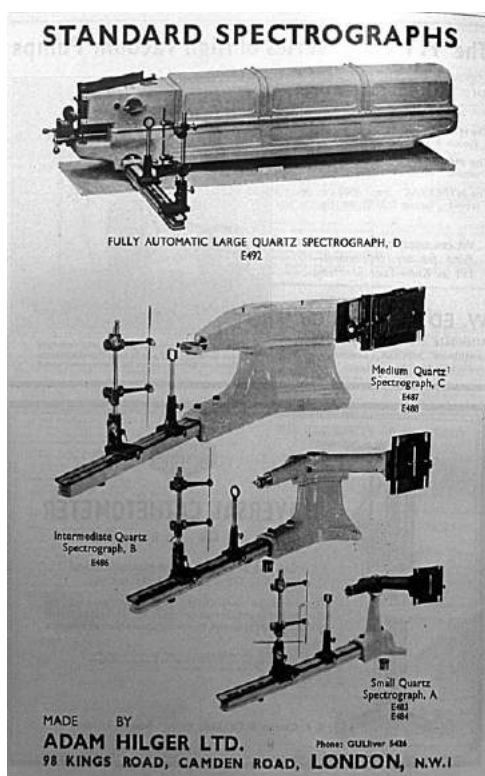


Fig. 5.30. Espectrógrafo de cuarzo, con placas fotográficas. 1935.

Este tipo de espectrógrafos fue perfeccionándose con el tiempo mediante la incorporación de dispositivos diseñados para conseguir mayores niveles de automatismo en las operaciones, especialmente de aquellas relativas al análisis cuantitativo, o a la identificación y catalogación de las líneas espectrales. En un primer momento, se incluyeron en las copias positivadas escalas relativas a las longitudes de onda con el fin de facilitar estas tareas; también se utilizaron patrones de espectros ya existentes como elemento de referencia con los que identificar los nuevos, o se llegó a utilizar placas de material muy ligero para lograr una pequeña curvatura del plano focal con objeto de

conseguir una separación más acentuada de las líneas. El rumbo marcado por este tipo de demanda, primordialmente de carácter fotométrico y de contabilización, atrajeron la atención de los científicos hacia las nuevas técnicas fotoeléctricas, que resultan mucho más precisas y adecuadas para esta clase de operaciones. Se abrió, por tanto, un nuevo camino para la espectrografía, caracterizado por la coexistencia de dos metodologías: la fotográfica, como forma de registro de las radiaciones, y la fotoeléctrica, como modo de análisis.

### ***5.5.1. La espectrografía en la era electrónica***

Un procedimiento nacido de esta confluencia entre fotografía y fotoelectrónica fue la *electronografía*, una técnica perteneciente al ámbito de la astronomía, que estuvo destinada en un principio a potenciar la sensibilidad de las emulsiones fotográficas por medios electrónicos. La utilización de los primeros tubos fotomultiplicadores y de los intensificadores de imagen en los ámbitos de la fotometría y de la fotografía estelar, supuso un aumento del 20% de la eficiencia cuántica de las emulsiones fotográficas. El procedimiento habitual, por entonces, era fotografiar directamente la pantalla fosforescente de estos dispositivos electrónicos con emulsiones convencionales, algo que redundaba de forma negativa en la resolución de las imágenes. La necesidad de transferir la distribución de brillos de la pantalla a la emulsión a través del sistema óptico de la cámara, y las propias características reproductivas del fósforo eran fundamentalmente las causas de esta pérdida. En 1935, André Lallemant<sup>79</sup> consiguió que los fotoelectrones producidos por los intensificadores y los fotomultiplicadores incidieran de forma directa sobre la placa fotográfica, en este caso, en emulsiones nucleares procedentes de los laboratorios dedicados al registro del trazo de las partículas atómicas. El inconveniente de este primer método fue la necesidad de emplazar la pequeña placa en el interior del tubo de vacío, lo que obligaba a romperlos una vez utilizados. Años más tarde, J. D. McGee propuso sustituir la pantalla de fósforo por una lámina de mica muy fina, permitiendo el paso de los fotoelectrones y el registro en una emulsión que era colocada en estrecho contacto con dicha lámina. Esta técnica hizo posible la integración de sucesivas exposiciones relativas a un mismo fenómeno u objeto celeste, y mantener intacto los dispositivos electrónicos utilizados. Pronto se comprobó que era una técnica muy idónea para ser utilizada en espectroscopía estelar, adoptando el nombre particular de *espectracon* (Spectracon Image Tube).

La *electronografía* en la actualidad, es aplicada en diferentes áreas de la ciencia tras haber sufrido múltiples modificaciones que han afectado sustancialmente a sus procedimientos, con un desplazamiento paulatino de las técnicas fotográficas convencionales en favor de las electrónicas, y con una presencia creciente de los ordenadores. Es importante señalar que, tras su aparición, fueron numerosos los intentos por encontrar nuevas fórmulas que consiguieran mayores niveles de sensibilidad de las emulsiones fotográficas, no solamente por medio de su alianza con los nuevos dispositivos electrónicos nacidos de la fotoelectricidad, sino también con otros métodos dignos de tener en cuenta. El lavado de las emulsiones pancromáticas en amoníaco o en agua, y luego calentadas a 50° C, por ejemplo, logró reducir los niveles de exposición de forma considerable en trabajos de fotometría. O el depósito de las emulsiones en un medio al vacío durante horas, previo a ser utilizadas en tareas similares, ayudó también a reducir el tiempo de exposición. Esta última técnica se completó en ocasiones con sucesivos calentamientos de la emulsión en una atmósfera de nitrógeno seco, o con la inmersión de las emulsiones en este mismo elemento, libre de oxígeno, y en tanques llenos de gas en los que se inyectaban ráfagas periódicas de nitrógeno de alta pureza. Estas técnicas han sido ampliamente utilizadas en el ámbito de la astronomía hasta fechas muy recientes por diversos observatorios en el mundo.<sup>80</sup>

Los fotomultiplicadores son, tal vez, los máximos responsables del cambio ocurrido en las técnicas espectrográficas hacia mitad del siglo pasado. En áreas como la espectrofotometría, su presencia fue realmente decisiva. En un principio sirvieron de apoyo a las técnicas fotográficas, aportando una precisión mayor en las labores de medición, exposición y evaluación del material fotosensible. Para ello, se apoyaron fundamentalmente en las células fotoeléctricas encargadas de



Fig. 5.31. Espectrómetro de IR. 1957.

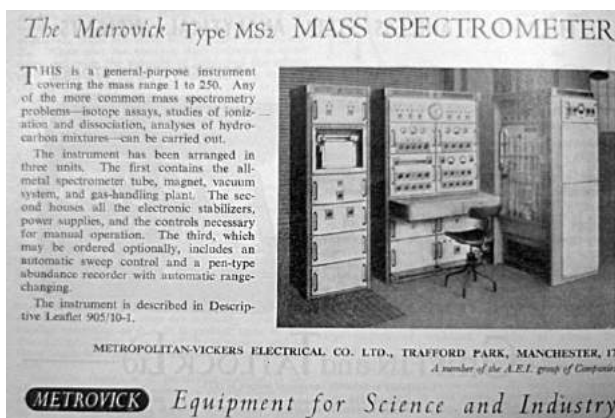


Fig. 5.32. Espectrómetro de masas con dispositivo de salida de impresión de curvas espectrométricas. 1950.

hacer las mediciones de las luces utilizadas, o en los microfotómetros de construcción electrónica, capaces de trasladar las diferentes densidades fotográficas del espectro de forma automática a un rollo de papel milimetrado en el que se grababan los datos y los gráficos mediante un estilete. En poco tiempo, la fotografía comenzó a ser un elemento subsidiario, dado que el trazado de los espectrogramas comenzó a ser plasmado en el papel directamente desde los dispositivos electrónicos. (Figura 5.31; 5.32.).

*De un interés más inmediato, sin embargo, son los diversos espectrofotómetros, en los que la propia detección es llevada a cabo por los fototubos. Se ha constatado que se pueden obtener niveles de resolución y de sensibilidad similares a los del registro fotográfico con los fotomultiplicadores. Además, el método fotoeléctrico presenta la ventaja de un ahorro de tiempo, y de vencer las dificultades propias de las placas fotográficas, relativas a su respuesta espectral, y a los tiempos establecidos para el revelado, ambos muy variables.<sup>81</sup>*

La aparición de las técnicas de visualización fotoelectrónica supuso un paso más en este sentido. Mientras que con la fotografía convencional eran precisos tiempos de procesamiento de 20 a 30 minutos para obtener un resultado visual, con los nuevos espectrográfos electrónicos se obtenía en un minuto, permitiendo lecturas directas e inmediatas. Además, no era necesario la calibración de la película de acuerdo con las longitudes de onda estudiadas, se contaba con un aumento sustancial de la sensibilidad a la luz, especialmente en niveles de escasa luminosidad, y el análisis era mucho más preciso, debido a que la comparación con los patrones de referencia existentes se hacía de forma



Fig. 5.33. Espectrógrafo de rayos X para el análisis de aleaciones, componentes, mezclas, etc. 1956.



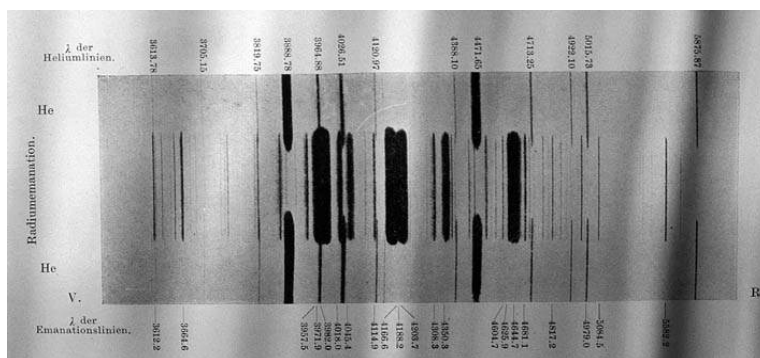


Fig. 5.34. Espectro del radio. E. Rutherford.

automatizada, con la posibilidad adicional de poderse presentar rápidamente los resultados, impresos o visualizados en los monitores (ver fig. 5.44.).

Por el contrario, fue la espectrografía óptica tradicional la que fijó las bases del desarrollo espectroscópico hacia otras latitudes del

espectro electromagnético. Si su área de acción estaba circunscrita al espectro visible, al IR y al UV, extendiéndose dentro de este último a los fenómenos de fluorescencia, pronto se supo aprovechar otros tipos de radiaciones, como los rayos X, las radiactivas (Figura 5.33. y 5.34.) o la emisión de electrones, para dar lugar a la espectroscopía por difracción de rayos X, la gammagrafía y la espectroscopía de masas respectivamente. Adicionalmente, ya vimos cómo se supo aprovechar otros fenómenos producidos por la luz, como la dispersión, la interferencia o la polarización, para encontrar nuevas vías de desarrollo. La *espectroscopía Raman* fue un ejemplo de ello. En 1928, Chandrasekhara V. Raman publicó su libro *La difracción molecular de la luz*, y un artículo titulado *La nueva radiación*, en los que formuló la existencia de un efecto secundario detectado en la difusión de la luz a través de medios transparentes. Cuando una muestra de una especie química líquida y transparente es sometida al haz de una luz monocromática, emite una serie de radiaciones, además de la excitatriz, que son independientes de ésta y de la temperatura. Estas son características de la especie química estudiada, y dan a conocer el tipo de átomo que la constituyen, y la disposición y naturaleza de los enlaces atómicos. Este hallazgo dio lugar a una nueva técnica espectrográfica que, con el tiempo, ha tenido un gran impacto en la ciencia, especialmente en química orgánica para el estudio de estructuras moleculares. En un principio, la espectrografía Raman se llevó a cabo con luz monocromática, espectrógrafos de gran capacidad dispersiva y con tiempos de exposición fotográfica muy largos. La llegada del láser en la década de los sesenta abrió una nueva etapa de mayor precisión en este tipo de técnica.

Para estas fechas, la espectroscopía se había convertido en una de las técnicas de mayor prestigio y aplicación en la ciencia. Los niveles de precisión aportados por sus imágenes sirvieron para fijar y definir los patrones de medida estandarizados, especialmente los de longitud y tiempo, ahora bajo criterios espectroscópicos. En 1907, se creó la nueva unidad de medida estándar de longitud, equivalente a la línea espectral de 6.438 Å perteneciente al cadmio, reemplazando la existente del metro. En 1960, esta medida sufrió una nueva revisión, siendo reemplazada por la línea naranja del Kriptón a 6.058 Å. Asimismo, se comprobó que la técnica espectroscópica podía dar una medida más exacta del tiempo por medio de la frecuencia, con niveles de precisión mayores incluso a los que proporcionaba para la longitud. En la actualidad, se emplea para la medición del tiempo el reloj atómico de cesio, a 9,193 MHz, que es la unidad estándar de la frecuencia. Otros hechos de especial relevancia, ocurridos en el ámbito de la espectroscopía, se produjeron también en estos años. Por un lado, Johannes Stark comprobó el desdoblamiento de las líneas espectrales de las radiaciones ante la presencia de campos eléctricos, recibiendo por ello el Nóbel de física de 1917. El *efecto Stark*, tal como sería conocido en el futuro, fue de gran ayuda a la hora de profundizar en el estudio de las relaciones que se producen entre los cambios de estructura de átomos y moléculas, y de sus respectivos espectros. Y por otro, en

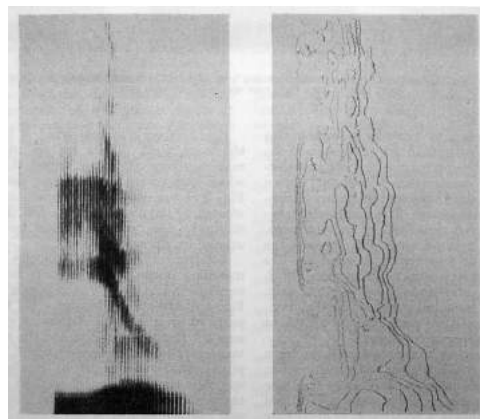


1929, Edwin Hubble formuló su famosa hipótesis acerca del alejamiento progresivo de las galaxias, como resultado del desplazamiento hacia el rojo de los espectros de las estrellas, hecho observado en 1912 por Vesto Slipher. (ver Figura 5.26). La noticia tuvo un gran impacto más allá de los círculos científicos, tras precisar este astrónomo que el alejamiento se produce no de forma aleatoria, sino directamente proporcional a la distancia que nos separa de las galaxias, lo que viene a significar que el universo está en continua expansión<sup>82</sup>.

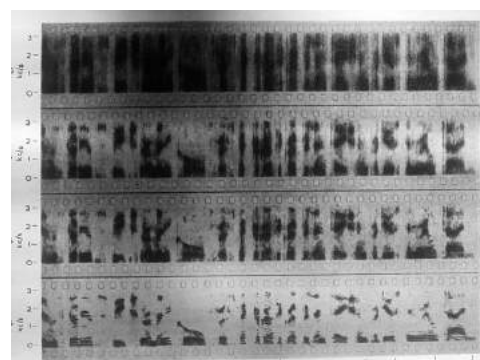
La precisión de los métodos espectroscópicos experimentó un nuevo avance como resultado del desarrollo del radar y de la tecnología de radiocomunicaciones en el espectro de las microondas, ambas técnicas fuertemente impulsadas por las necesidades de la segunda guerra mundial. Las experiencias obtenidas con este tipo de tecnologías durante la contienda, tuvo como resultado el desarrollo de una serie de instrumentos claves para la historia de la ciencia, tales como la espectroscopía de microondas, el máser, la espectrografía acústica, o los primeros ensayos de resonancia magnética. La primera aportó unos niveles de resolución muy altos, que se tradujeron en mediciones muy fiables y estables de las longitudes de onda.<sup>83</sup> Los trabajos de Good y Bleany, ya comentados en capítulos anteriores (ver Cap. 4.1.), sobre la aplicación de las microondas al estudio del amoníaco y de otras moléculas, fueron precursores en este campo. Por su parte, tanto Charles H. Townes, creador del máser, como Arthur L. Schawlow, ambos dedicados al desarrollo del radar durante la contienda, emprendieron también trabajos decisivos en este tipo de espectroscopía, convirtiéndola en poco tiempo en una de las tecnologías claves para el estudio atómico y molecular. El espectrógrafo acústico fue desarrollado durante la guerra en los laboratorios Bell, y se aplicó con intensidad en tecnología del habla y en estudios de fonética, siendo un antecedente directo de la espectroscopía de microondas. (Figura 5.35. y 5.36.) Por último, los trabajos de Willis E. Lamb, Aleksandr Prokhorov, Alfred Kastler, entre otros, fueron cruciales en estas mismas áreas, especialmente al ser aplicados a las nuevas técnicas de resonancia.



*Fig. 5.37. Resonancia magnética del flujo sanguíneo en el cerebro de un muchacho de 16 años. Se ve la silueta de la cabeza desde atrás. c.a. 1990.*

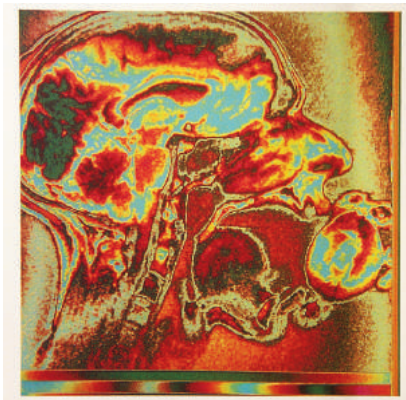


*Fig. 5.35. Espectrograma de una voz masculina diciendo "you". A la derecha, el contorno del espectrograma. 1962.*



*Fig. 5.36. Análisis espectral continuo con un analizador de tiempo real. Señales de habla. 1961.*

La espectroscopía de microondas dio un nuevo impulso a la línea de trabajo abierta antes de la guerra por Isaac I. Rabi y su escuela, dedicados a buscar vías prácticas a los conceptos de *momento nuclear* y de *spin electrónico* a través de investigaciones sobre resonancia atómica, molecular, paramagnética, ferromagnética, etc.<sup>84</sup>



**Fig. 5.38. Resonancia magnética coloreada de cabeza comiendo una ciruela. c.a. 1990.**

Este tipo de espectroscopía consiste en la aplicación de un campo magnético y de un haz de microondas a la muestra a un mismo tiempo, esto produce un entrecruzamiento que permite la detección muy precisa de los electrones libres presentes (ver Figura 4.11). Con el tiempo, esta técnica se aplicó a la producción de imágenes, especialmente en el campo de la medicina, adquiriendo el nombre genérico de *Imagen por Resonancia Magnética* (Magnetic Resonance Imaging), técnica desarrollada por los nóbeles Pete Mansfield y Paul Lauterbur a principios de los setenta<sup>85</sup>. En este caso, se aprovecha el comportamiento de los núcleos atómicos del hidrógeno, a los que se le aplica un campo magnético intenso que logra orientarlos temporalmente en una determinada posición. Al mismo tiempo, se envían pulsos de microondas que son recogidos mediante escáner. El diagnóstico por imagen por resonancia magnética, ampliamente utilizado en los hospitales de hoy día, ofrece imágenes monocromáticas en tiempo real (Figura 5.37.). Los actuales programas de tratamiento de imágenes ofrecen la posibilidad de colorear estas imágenes para conseguir un mayor contraste y separación de las partes registradas. (Figura 5.38.).

La llegada del láser en la década de los sesenta sirvió para impulsar una serie de espectroscopías ya existentes, como la Raman, la atómica y la molecular; y para abrir nuevos horizontes en este tipo de técnicas, especialmente en lo que se conoce como espectroscopía de resolución temporal mediante la utilización de pulsos ultracortos y de gran intensidad. Tras los años de la guerra, los ensayos con detonaciones en gases ionizados a altas temperaturas, comúnmente llamados plasmas, abrieron el camino a este tipo de espectroscopía. Las reacciones termonucleares, los primeros ensayos de generación de energía por métodos magnetohidrodinámicos de descargas intensas y ultracortas (descargas de constricción toroidales) en plasmas, o de pulsos de neutrones producidos en aceleradores<sup>86</sup>, potenciaron el desarrollo de técnicas de registro de alta velocidad, de carácter espectroscópico y fotográfico. Los instrumentos fotográficos de alta velocidad más avanzados hasta entonces, como las cámaras de tambor, de barrido en línea (Streak camera), de espejos giratorios, o cinematográficas, fueron aplicados a los espectrógrafos junto a dispositivos electrónicos como fotomultiplicadores o convertidores de imagen<sup>87</sup> (ver Cap. 4.2.3). Esta conjunción de técnicas posibilitó la identificación de nuevas líneas espectrales y el análisis de la densidad y temperatura de electrones, o la distribución del plasma en descargas producidas en distintos elementos. En este contexto, la generación de pulsos ultracortos, tanto de microondas como de láser, supuso un nuevo avance para este tipo de espectroscopía. Los trabajos más recientes de Nicolay G. Basov, o de Ahmed Zewail, entre otros, en el campo de los resonadores ópticos y de la tecnología láser han sido determinantes.

Aunque el campo de aplicación de la fotografía en este nuevo tipo de espectroscopía fue disminuyendo en beneficio de la tecnología fotoeléctrica, su presencia se mantuvo durante años en áreas en las que la calidad y resolución de las imágenes eran requisitos muy importantes. Uno de estos campos, próximo a la espectroscopía, fue la fotografía multiespectral. Su fundamento radica en la idea de que los objetos pueden ser fotografiados en más de una franja del espectro electromagnético, ya sea dentro de la gama visible o dentro de las radiaciones invisibles. De hecho, la fotografía en color sigue este esquema de producción. La fotografía multiespectral se consigue mediante un sólo sistema óptico, bien

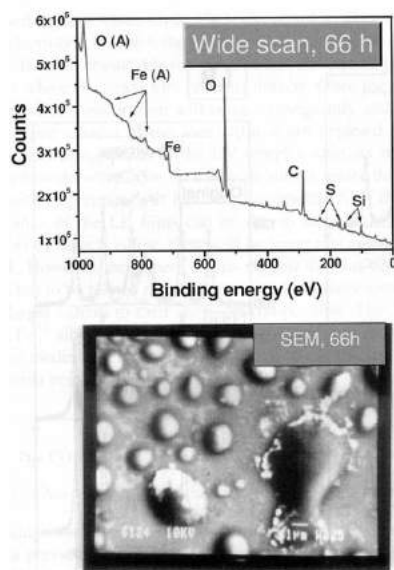
utilizando una película de varias capas, o con la intervención de un sistema óptico múltiple que incorpora diferentes filtros. Normalmente, sus resultados son monocromáticos, pero con la posibilidad de añadirse un canal de color. Este tipo de fotografía fue ampliamente utilizado con fines militares y de reconocimiento durante la segunda guerra mundial, especialmente para la detección de objetos camuflados<sup>88</sup>. Posteriormente, la *cámara multispectral MPC* (Multispectral Photographic Camera) del programa espacial Skylab de la NASA, se utilizó para el estudio de los recursos naturales en la tierra y en labores de cartografía. Esta cámara tomaba seis fotografías simultáneas en distintas longitudes de onda (visible e infrarrojo), a través de un sistema de seis lentes perfectamente engarzadas. Normalmente, operaba con película en blanco y negro, por disponer de niveles de resolución y latitud mayores que las emulsiones de color, y por permitir la selección de una longitud de onda determinada, acorde con el objeto en cuestión. La apariencia de estas fotografías es la de un mapa contorneado en falsos colores asignados arbitrariamente a los objetos de reconocimiento. También se pueden utilizar capas en negativo para favorecer la discriminación de ciertos elementos, y utilizar un densitómetro acoplado a un ordenador para el análisis de las diferentes densidades. Como comprobaremos en el capítulo dedicado a la imagen astronómica, fue en este ámbito de aplicaciones, asociadas a los programas espaciales estadounidenses, donde surgieron los primeros desarrollos de imagen digital.

### ***5.5.2. La imagen en la nueva espectroscopía***

El panorama actual de la espectroscopía no puede ser más diverso y multidisciplinar. Esta técnica de análisis, que cumplen en estas fechas los doscientos años de existencia, queda clasificada de acuerdo con múltiples parámetros: según su campo de aplicación (electroquímica, química molecular, astronomía, superficies, etc), en base al nivel de análisis que acometen, si es a una escala molecular o atómica; de acuerdo al tipo de radiación que utilizan (Visible, UV, fluorescencia, IR, microondas, resonancia, rayos X, electrones, neutrones, etc.), o del fenómeno que experimenta la luz o la radiación en su interior (absorción, emisión, dispersión, reflectancia, etc.). En este sentido, analizar el estado actual de estas técnicas a través de un caso concreto, puede ser altamente esclarecedor, más si cabe, si se trata de un ámbito de aplicación de relativa novedad, como es la ciencia de superficies, en el que se debate profundamente el estado del arte de la ciencia espectroscópica<sup>89</sup>, y del que se pueden extraer conclusiones muy sustanciosas relativas al papel desempeñado por la imagen en la adquisición de conocimiento, tema central de esta obra.

La *ciencia de superficies* es una rama de la ciencia que ha cobrado un gran protagonismo en la actualidad por estar dedicada al estudio de una nueva entidad física que cobra peso por días, y que no es otra que esa franja o región fronteriza que existe entre los cuerpos, o entre dos medios cualesquiera, y que se caracteriza por presentar lo que es considerado un nuevo estado de la materia, de composición singular y con propiedades totalmente propias en cuanto a estructura, estados electrónicos, dinámica atómica, y uniones químicas<sup>90</sup>. El origen de esta ciencia se sitúa en el desarrollo de la química de superficies, rama de la ciencia desarrollada, entre otros, por I. Langmuir a principios del siglo XX. Este científico comprobó cómo los procesos químicos y catalíticos producidos en las superficies no se deben a la presencia de películas gruesas de moléculas condensadas sobre ellas, sino a moléculas gaseosas distribuidas en capas que son atraídas por los sólidos de la misma forma que los átomos de un cuerpo entre sí. El campo de aplicación del análisis de superficies es mayormente en la industria química, metalúrgica y electrónica, teniendo un gran peso en los procesos catalíticos, en el





**Fig. 5.39.**  
*Estudios de corrosión de láminas ultrafinas de hierro. Arriba un espectro de rayos X obtenido al vacío; abajo una microscopía electrónica de barrido (SEM) de la muestra, tras 66 horas de exposición al ambiente agresivo. Marco y Gancedo, CSIC. 1984.*

estudio de la energía solar, o en fenómenos de corrosión. Dentro de la electrónica, hay que destacar su papel en el estudio y desarrollo de los materiales semiconductores, entre ellos, los actuales sensores para la adquisición de imágenes presentes en cámaras y escáneres. Si hasta los sesenta, este tipo de tecnología estaba destinado al control del comportamiento de los metales semiconductores a niveles macroscópicos, en la actualidad, gracias a estas nuevas técnicas, el grado de refinamiento y control es a nivel de microanálisis de sistemas multicapas de múltiples fases, cada uno de ellos con su

propia composición, estructura y propiedades eléctricas. Para el estudio de los metales y de los materiales semiconductores, la limpieza a nivel atómico es de extrema importancia, de aquí la necesidad de generar técnicas que permitan niveles de vacío que son denominados en la actualidad de *alto vacío* o *ultra- vacío*. En esta escala, sólo las superficies que han sido limpiadas de gases adsorbidos durante el tiempo necesario para realizar las observaciones, mediante técnicas de calentamiento en vacío, o por inyección de descargas débiles producidas por un gas inerte, pueden ofrecer resultados significativos.<sup>91</sup>

El estudio de las superficies está totalmente ligado a la espectroscopía y a las técnicas de producción de vacío, concretamente a la *Espectroscopía de electrones Auger* (Auger Electron Spectroscopy o AES), la de *Mössbauer* (Integral Conversion Electron Mössbauer Spectroscopy o ICEMS), y la de *Fotoelectrones por Rayos X* (X-Ray Photoelectron Spectroscopy o XPS, o ESCA, cuando es para análisis químico). La Auger, con el tiempo, ha conseguido presentar resultados en imágenes resueltas espacialmente, y el conjunto de estas técnicas ofrece mediciones, tanto cualitativas como cuantitativas, acerca de la homogeneidad existente en la composición de las superficies. La utilización de vacío o de estados criogénicos puede dar lugar a una nueva catalogación de las espectroscopías, redundando en una mayor complejidad de este universo. Otras técnicas de visualización aplicadas al estudio de superficies son la *Microscopía de Campo Iónico* (Field-Ion Microscopy), la microscopía electrónica, tanto de transmisión como barrido (TEM y SEM), la microscopía de *Dispersión de Iones en Sólidos* (Ion-Solid Scattering), o la *Difracción de Electrones de Baja Energía* (Low-Energy Electron Diffraction, o LEED). El conjunto de todas estas técnicas ofrece unos resultados en los que la información numérica se interrelaciona con gráficos e imágenes, hecho que nos hace pensar que el concepto de observación en ciencia está sufriendo una transformación tanto en lo que concierne a la presentación de resultados con un nivel de integración de la información, como en el proceso de adquisición, donde el concepto sonda desempeña un papel determinante (Figura 5.39). Este es un término globalizador que absorbe el valor semántico de toda suerte de dispositivo receptor de energía, y con capacidad de transformarla en datos numéricos o imágenes. Si partimos de un esquema metodológico, que tomamos prestado de la espectroscopía de superficies<sup>92</sup>, en el que se distinguen tres fases en todo procedimiento experimental: a) una fuente de radiación; b) una cámara de interacción; y c) un detector/analizador, podemos comprender que las técnicas de exploración pueden multiplicarse hasta el infinito.



*La superficie de un material puede ser sometida a la acción de distintas sondas (fotones, electrones, iones, calor, campo eléctrico, partículas neutras, entre otros). La interacción “sonda- superficie” puede cambiar la dirección de la radiación incidente, o bien producir estados excitados transitorios en el material que, al relajarse, originarían un conjunto más o menos complejo de radiaciones emergentes de la superficie en cuestión (fotones, electrones, iones, calor, campo eléctrico, partículas neutras, etc.) Si nos circunscribimos a los seis tipos de sonda citados anteriormente en los paréntesis, que a su vez pueden generar los mismos tipos de radiación emergente, el número de combinaciones sonda - respuesta alcanza el valor de 36... Este número, sin embargo, se supera ampliamente en la realidad puesto que, para una misma combinación sonda- respuesta, el experimentalista puede focalizar su interés en aspectos parciales referentes tanto a la propia magnitud a medir; como a su origen, intervalo, modo, método, etc.; ello implica que el número de técnicas conocidas usualmente como espectroscopía de superficie sea interminable.<sup>93</sup>*

Si a ello, añadimos un cuarto escalón, esencial en esta investigación, que es la producción de imagen como resultado de este proceso cuyo origen se encuentra en la sonda, el panorama se complica aún más. Bajo una perspectiva histórica de las tecnologías espectroscópicas como la que este capítulo se propone, llama poderosamente la atención el hecho de que la visualización de los resultados haya pasado a un segundo plano a medida que este tipo de técnicas ha ido progresando en el tiempo. La información cualitativa que toda imagen fotográfica proporciona, tal como hemos observado en las espectroscopías clásicas, ha ido diluyéndose en beneficio del dato, del gráfico, o de la representación topológica. La matematización progresiva de la ciencia, que se extiende por días al campo de la imagen, nos ha llevado a un binomio esencial en el conjunto de la instrumentación científica con grandes repercusiones epistemológicas, y que no es otro que el señalado por Galison de lógica e imagen.<sup>94</sup>

## Notas del capítulo 5

- 1 Aznárez, J. A. En entrevista con el autor, en mayo de 2005.
- 2 Gubern, Román. En Pérez Ornia J. R. *El arte del vídeo*. Ed: Serbal- RTVE, 1991. p 13.
- 3 Ibid. p 14.
- 4 Op. cit. Hoadley. p 562.
- 5 Hurter, Ferdinand y Driffeld, Vero Charles. *Photochemical Investigations and a New Method of Determination of the Sensitiveness of Photographic Plates*. Journal of the Society of Chemical Industry, 1890. Memorial volume. Royal Photographic Society, 1920.
- 6 Adams, Anselm. *The Negative*. Little, Brown and Company, 1989. p 86.
- 7 Ibid.
- 8 Neblette, C. B. *La fotografía, sus materiales y procedimientos*. Ediciones Omega, . p 167.
- 9 Slater Price, T y Rawling, S. O. *The Theory of Photographic Sensitivity*. Nature, 22 de Agosto, 1925, p 282.
- 10 Gurney, R. W. y Mott, N. F. *The Theory of the Photolysis of Silver Bromide and the Photographic Latent Image*. Proc. Royal Society. 164 A. 151. 1938.p 151 y ss.
- 11 Toy, F. C. *The Mechanism of Formation of the Latent Photographic Image*. Nature, 24 de septiembre de 1927. p 441. (Traducción propia)
- 12 Mitchell, J. W. *Photographic Sensitivity*. Rep. Prog. Phys. London Physical Society. 20. 433. 195. p 433 y ss. 1957.
- 13 James, T. H. *The Change in the Concepts and Outlook of the Photographic Scientist: 1928- 1978*. The Journal of Photographic Science, Vol. 26, 1978. p 216 y ss.
- 14 Schade, O. H. *Image quality. A Comparison of Photographic and Television Systems*. Princeton, NJ. RCA Laboratories. 1975.
- 15 Op. cit. Burke. p 697-8.
- 16 Op. cit. Robillard. p 18 y 19.
- 17 Ibid, p 20. (Traducción propia)
- 18 Mees, C. E. Keneth. *The Production of Scientific Knowledge*. Nature, Jan. 3, 1918. p 355 y ss.
- 19 Op. cit. Allen. p 7.
- 20 Si ambas fórmulas quedan englobadas bajo el término general de células fotoeléctricas, no está de más insistir en que obedecen a procesos fotoeléctricos diferentes. Por un lado, encontramos los denominados fototubos, que están basados en el fenómeno de fotoemisión, comunmente denominado fenómeno fotoeléctrico; y por otro, los dispositivos que obedecen al fenómeno de la fotoconducción, que dan lugar a las células de selenio, preferentemente.
- 21 Consiste en la disparidad de respuesta que presenta nuestra visión ante niveles de luz diferentes, y dependiendo del color de la misma, especialmente, en condiciones de escasa iluminación
- 22 Op. cit. Burke. p 42.
- 23 Klüber, H von. *Photographic Photometry*. En En Progress in Photography 1951- 1954. Focal Press. p 143.

- 24 Op. cit. Klüber. p 154. (Traducción propia)
- 25 Op. cit. Zworykin. *Photo- electricity*. p 297 y ss.
- 26 VV. AA. *The Focal Encyclopedia of Photography*. McGraw Hill, 1976. p 890.
- 27 La *candela*, unidad de potencia lumínica, quedó definida en 1936, como la luminancia de un cuerpo perfectamente irradiador a la temperatura de fundición del platino, lo que se corresponde con 60 unidades, o candelas por centímetro cuadrado ( $\text{cd/m}^2$ ). El *lumen* hace mención al flujo luminoso que incide en un pie cuadrado de superficie, que se encuentra a un pie de distancia de una fuente de luz, equivalente a una candela (Foot Candle). Por el contrario, cuando atendemos a la intensidad de luz que llega a una superficie, se utiliza el *lux*, que equivale a un lumen de luz, distribuido sobre una superficie de un metro cuadrado; o lo que sería lo mismo, la iluminación por metro cuadrado de una superficie, que se encuentra a un metro de una fuente de luz de una candela.
- 28 Ibid. p 482.
- 29 Gran parte de la información recogida en las siguientes páginas ha sido recopilada de las obras: Murray, Richard D. *Silverless Imaging Systems*. En Neblette's Handbook of Photography and Reprography. *Materials, Processes and Systems*. Ed. John M. Sturge. Van Nostrand Reinhold Company, 1977. Kosar, Jaromir. *Light- Sensitive Systems: Chemistry and Application of Nonsilver Halide Photographic Processes*. John Wiley & Sons, 1965. Y Brinckman, E. Delzenne, G. Poot, A. Willems J. *Unconventional Imaging Processes*. The Focal Press, 1978.
- 30 Op. Cit. Eder, p 550 y ss.
- 31 Ver tabla. Op. cit. Murray. p 452.
- 32 Op.cit. *Focal Encyclopedia*. p 109.
- 33 Dérivé, M. Porchez, J. y Tendron, G. *La fotografía científica*. Ediciones Omega, sin fecha. Título original: La Photographie Scientifique. p 2 y ss.
- 34 Sweet, R. G. *High Frequency Recording with Electrostatically Deflected Ink Jets*. Rev. Sci. Instr., 36. Enero de 1965. p 131 y ss
- 35 Tal como se observó en el laboratorio de Proteómica, del Centro de Biología Molecular Severo Ochoa., de la Universidad Autónoma de Madrid. CSIC.
- 36 Hunter, J. R. *Photographic Recording of Agar Difussion Plates*. Nature. 2 de mayo de 1959. p 1283- 4.
- 37 Ressler, N. *Application of Direct Photographic Photometry to Preparative Electrophoresis*. Nature. 16 de agosto de 1958. p 463- 4.
- 38 deLong, R. *Use of Agar Difussion and Fluorescent Antibody*. Nature. 17 de junio de 1961. p 1126- 7.
- Herman, R. H.; Clayton, L. E.; y Bruton, J. *Preparation of Ultra- Violet Fluorescent Photographs of Stereoids*. Nature. 13 de enero de 1962. p 169- 170.
- 39 Gran parte de la información recogida en estas páginas procede de las entrevistas llevadas a cabo con Rosa Lebrón, del Servicio de Cromatografía y Espectrometría de masas, del Instituto de Química- Física Rocasolano, del CSIC
- 40 Weil, H. y Trevor, W. I. *History of Chromatography*. Nature. 9 de diciembre de 1950. p 1001. Y Barbas C. y Rupérez F. J. *En memoria de Tswett. 100 años de cromatografía*. (Sin publicar)
- 41 Harrison, D. C. *Chromatography*. Nature. 5 de febrero de 1955. p 245.
- 42 Cook, A. H. en *Chromatographic Separation of Natural Compounds*. Nature. 20 de agosto de 1949. p 300.

- 43 Ibid. p 302. Y Fink, R. M; Dent, C. E; y Fink, K. *Application of Filter Paper Partition Chromatography to Radioactive Tracer Studies*. Nature. 6 de diciembre de 1947. p 801 y ss.
- 44 *You can never get something for nothing, not even an observation*. Citado por Leon Brillouin en *Information Theory and its Applications to Fundamental Problems in Physics*. Nature. February 21, 1959. p 502.
- 45 Op. cit. Anderson. *Photoelectric...*p 180 y ss..
- 46 El conjunto de las radiaciones, la luz incluida, se distribuyó conforme a las longitudes de onda detectadas en cada una de ellas. La luz visible quedó reducida a una mínima franja de un espectro amplísimo, que se expande desde los rayos cósmicos, con longitudes de onda de valores entre 2 y 5 milésimas de Angstrom, hasta las ondas de radio, que llegan a alcanzar longitudes de onda de kilómetros. La luz captada por nuestros ojos, en sus múltiples manifestaciones, queda comprendida entre los valores de 4.000 y 7.000 Å de longitud de onda, aproximadamente, y sus valores extremos corresponden al violeta y el rojo, respectivamente.
- 47 Clark, W. *Photography by infrared. Its principles and Applications*. Wiley, 1946. p 2.
- 48 Brooker, L. G. S. *Sensitizing and Desensitizing Dyes*. En Mees, C. E. Keneth. *The Theory of the Photographic Process*. MacMillan 1966. p 198.
- 49 Ibid. p 173.
- 50 Op. cit. Clark. p 5 y ss.
- 51 Hansell, Peter. *Ultraviolet and Fluorescence Recording*. En Engel, Charles E. *Photography for the Scientist*. Academic Press, p 363 y ss.
- 52 Op. cit. Déribéré, p 37.
- 53 Op. cit. Hansell. p 380.
- 54 Op. cit. Déribéré. p 38.
- 55 Op. cit. Clark. p 6.
- 56 Lou Gibson, H. *Infra- Red Recording*. En Op. cit. Engel, Charles E. *Photography for the Scientist*. Academic Press, p 301 y ss.
- 57 Op. cit. Clark. p 320.
- 58 Ibid. p 338- 9.
- 59 Op. cit. Lou Gibson. p 354.
- 60 Op. cit. *Focal Encyclopedia*. p 782.
- 61 Varios autores. *The Effects of Atomic Weapons*. Los Alamos Scientific Labs. 1950. p 199.
- 62 Hillson, P. J. *Early Thermographic Systems*, I, Hunt, 1840. *The Journal of Photographic Science*. Vol. 31. 1983. p 252 y ss.
- 63 Op. cit. Burke. p 272.
- 64 Op. cit. Hoadley, en *Neblette's Handbook*. p 585.
- 65 Gran parte de la información que se recoge en esta breve exposición sobre el láser y la holografía procede de mi entrevista con Rodolfo Hernández, del Dpto. de Láser y holografía, del Centro de Física Miguel A. Catalán. Sección de Óptica y Estructura de la Materia, del CSIC.
- 66 Op. cit. Burke. p 240.
- 67 Op. cit. Burke. p 240.
- 68 Magyar, G. *Ultrashort Laser Pulses and their uses*. Nature. 6 de abril de 1968. p 16.



- 69 Gabor, D. *A new Microscopic Principle*. Nature. 15 de mayo de 1948. p 778.
- 70 Gates, J. W. C. *Holographic Methods of Visualization and Measurements in Engineering*. The Journal of Photographic Science, Vol. 19, 1971. p 64 y ss.
- 71 Butters, J. N; y Denby, D. *Some Practical Uses of Laser Beam Photography in Engineering*. The Journal of Photographic Science, Vol. 18. 1970. p 62.  
(Traducción propia)
- 72 Gabor, D. *Character Recognition by Holography*. Nature. 30 de octubre de 1965. p 422- 3. (Traducción propia)
- 73 Valentine, J. D. *Is Visual Memory Holographic?*. Nature. 2 de noviembre de 1968. p 474.
- 74 Gabor, D. *Holographic Model of Temporal Recall*. Nature. 10 de febrero de 1968. p 584.
- 75 Ibid. p 482.
- 76 Op. cit. Eder. *History of..* p 469.
- 77 Baines, H. *The Science of Photography*. Fountain Press, 1970. p 286.
- 78 Op. cit. *Focal*. p 1430.
- 79 Mackay, C. D. y Milson, A. S. *Imaging in Astronomy*. Nature. 8 de septiembre de 1972. p 116.
- 80 Corben, P. M; Reddish, V. C; y Sim, M. E. *Speeding up Astronomical Photography*. Nature. 3 de mayo de 1974. p 22.
- 81 Zworykin, V. K, y Ramberg, E. G. *Photo- Electricity and its Applications*. John Wiley and Sons, 1949, p 298. (Traducción propia)
- 82 Op. cit. Hawking. p 74-75.
- 83 Op. cit. Ingram. p 1146.
- 84 Bleany, B. *Spectroscopy at Radio- Frequencies*. Nature. 27 de enero de 1951. p 133 y ss.
- 85 Lauterbur, P. C. *Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance*. Nature. 16 de marzo de 1973. p 190.
- 86 Merrison, A. W; y Wiblin, E. R. *The Harwell Time-Of-Flight Neutron Spectrometer*. Nature. 3 de marzo de 1951. p 346.
- 87 Craggs, J. D. *Time- Resolved Spectroscopy*. Nature. 16 de diciembre de 1961. p 1032 y ss.
- 88 Op. cit. Hodley. p 585.
- 89 En la investigación de este tema, han sido fundamentales las entrevistas llevadas a cabo con Gancedo, J. R; y Marco, J. F. del Departamento de Espectroscopía de Superficie. Instituto de Química- Física "Rocasolano", CSIC.
- 90 Duke, C. B. *Atoms and electrons at surfaces: A modern scientific revolution*. J. Vac. Sci. Tech. A 2(2), 139- 43. 1984.
- 91 Steiner, H. A. Redhead. P. A. *Ultrahigh Vacuum*. Scientific American, 2- 13. Marzo de 1962.
- 92 Gancedo, J. R. *Métodos espectroscópicos de análisis de superficies*. Inst. Rocasolano, CSIC. p 209.
- 93 Ibid. p 209.
- 94 Op. cit. Galison. *Image and Logic*.



## Capítulo 6. La fotografía y la imagen electrónica: aplicaciones conjuntas. 1900- 1970.

*Una cantidad observable admite la observación instrumental directa, mientras una cantidad inobservable sólo puede ser materia de cálculo abstracto.<sup>1</sup>*

James Jeans

La mirada científica está dirigida hacia la naturaleza en todas sus formas y manifestaciones. Las técnicas de observación son múltiples, y obedecen a un proceso de creación acumulativo a lo largo de la historia. Si ampliamos el concepto de observación al conjunto de los sentidos, vemos cómo la instrumentación científica en general ha estado fundamentalmente dirigida a potenciar y ampliar estas facultades del ser humano. El registro de estas sensaciones, mediante el dibujo, la fotografía o los soportes magnéticos, no ha hecho más que completar este proceso. La imagen tecnológica muestra en la actualidad una complejidad y riqueza desbordantes, estando presente en actividades humanas tan determinantes como la ciencia, el arte, el registro documental, la publicidad, las artes gráficas, la reprografía, la telecomunicación y el entretenimiento. Lejos queda la clasificación ofrecida por Moholi Nagy en la primera mitad del siglo pasado, a modo de visión integral del procedimiento fotográfico, donde las aplicaciones científicas y artísticas son contempladas al unísono y en estrecha dependencia del estado de la técnica fotográfica del momento<sup>2</sup> (Cuadro nº 8).

Las nuevas visiones	Formas
Visión abstracta	Fotograma
Visión exacta	Reportaje
Visión rápida	Instantáneas
Visión lenta	Exposiciones prolongadas
Visión intensificada	Microfotografía, con filtros (IR)
Visión penetrante	Rayos X
Visión simultánea	Fotomontaje, sobreimpresiones
Visión distorsionada	Bromas ópticas, espejos, prismas, manipulación química del negativo

*Cuadro nº 8. Las nuevas visiones, según Lazlo Moholi Nagy. 1929.*

O el modelo propuesto por Otto Steinert, en el que destaca la separación establecida entre las capacidades reproductivas y creativas de este medio (Cuadro nº 9). Las clasificaciones podrían extenderse *ad libitum*, si al significado de lo fotográfico superponemos el concepto de imagen tecnológica. La complejidad del fenómeno iconográfico vendría determinado entonces por cinco variables fundamentales: la función social (artística, religiosa, científica, documental, tecnológica), su estructura y dinámica físicas, el modo de representación del

Tipología	Formas
•Imagen fotográfica como reproducción	Amateur, documental, ID, etc.,.
•Imagen fotográfica como representación	Artística, presencia del artista pero al servicio del objeto
•Creación fotográfica como representación	El objeto como excusa, abstracción, etc.,.
•Creación fotográfica absoluta	Fotograma, luminograma, fotomontajes, recorte, etc.,.

*Cuadro nº 9. La imagen fotográfica, según Otto Steiner, 1936.*

espacio (lineal, en perspectiva, fotocomposición, tridimensionalidad etc.), la forma de captación y procesamiento de la luz (analógica, digital, o mixta), y el modo de reproducción (papel, monitor, materiales diversos, etc.).

En el terreno de las aplicaciones científicas su campo de acción es también de una riqueza extraordinaria. El hecho de que nos centremos en esta ocasión en el estudio de las relaciones existentes entre la imagen tecnológica y la adquisición de conocimiento durante un período de tiempo determinado, unido a fines expositivos y taxonómicos, ha obligado a estrechar el punto de interés en tres áreas fundamentales del quehacer científico: la imagen de lo lejano, de lo diminuto y de lo móvil. Ni que decir tiene que el valor científico de la obra documental en su conjunto, independientemente de si su área de aplicación son las ciencias físicas, biológicas o psico- sociales, es innegable. Igualmente, cabría decir de la utilidad de la fotografía como herramienta de ayuda a la ciencia topográfica (fotogrametría), a la justicia, el deporte, la geología, o tantas otras disciplinas; más si cabe, cuando el área de aplicación de la imagen se expande cada día. La potenciación de la capacidad de observación humana a través de los instrumentos de captación y reproducción de imágenes, entiendo que se ha llevado a cabo en estos tres campos de la ciencia de una forma sobresaliente, por haberse vencido en ellos tres limitaciones básicas del aparato sensorial humano. La primera viene dada por el deseo de ver en la distancia, más allá de donde nuestros ojos alcanzan, siendo éste un campo de exploración asumido tradicionalmente por la astronomía. La segunda viene determinada por la imposibilidad de ver los cuerpos diminutos, allí donde el poder de resolución de nuestro aparato visual se agota, siendo preciso instrumentos que nos desvelen este universo oculto y tan inagotable como el de las estrellas. En este caso, la ciencia ha puesto en práctica multitud de técnicas, entre las que destacan las diferentes microscopías, las cámaras de expansión, los aceleradores de partículas, la autorradiografía, la difracción de rayos X y las emulsiones nucleares. El tercer ámbito viene determinado por la incapacidad de observar los fenómenos producidos en tiempos muy dilatados o extremadamente cortos. Esta área es estudiada por la *imagen de alta velocidad* y de *lapsus de tiempo*, y por técnicas como la *velocimetría* y la de *pulsos de alta velocidad*, ligadas estrechamente al concepto actual de *femtociencia*.

La fotografía y, por extensión, el resto de tecnologías de la imagen, han estado tradicionalmente muy ligadas a estas tres vías de aproximación a lo desconocido. Es importante resaltar que estos tres caminos se ven profundamente afectados por la capacidad de expansión hacia el espectro no visible adquirida por el conjunto de la instrumentación científica a lo largo de los dos últimos siglos. La antinomia entre lo observable y lo inobservable ha marcado el destino de la ciencia moderna. Ver



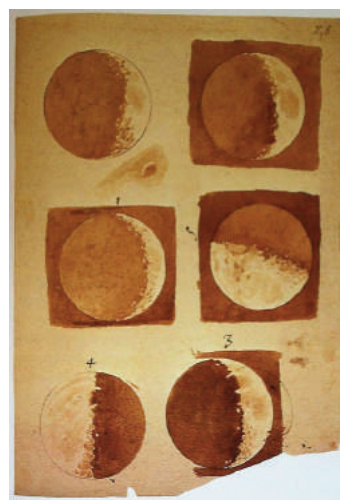
*para creer, ver es conocer, o prever para conocer*, son enunciados que reivindican un puesto de primacía para la observación dentro del método científico.

## 6.1. La imagen de lo lejano

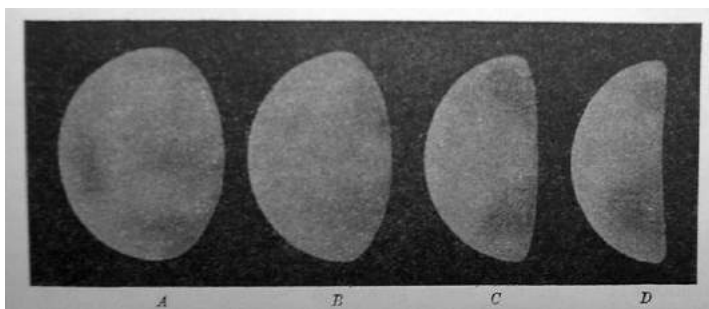
Antes de Galileo y de la invención del telescopio, los astrónomos contaban sólo con sus ojos para la observación del cielo, y con sus manos y memoria para describir lo que habían visto. El lenguaje descriptivo no deja de ser, en un sentido histórico y científico, una antesala que anuncia la llegada inmediata de la imagen. El valor documental de las descripciones escritas en el pasado es inestimable para la ciencia de nuestros días. Las tablillas cuneiformes encontradas en 1928, en las excavaciones de la antigua Ugarit, pertenecientes al segundo milenio a.C., dan buena cuenta de la formación del eclipse de sol ocurrido en 1.375 a.C., con un lenguaje lleno de poesía y misterio.

*El día de la Luna nueva en el mes de Hiyar se llenó de vergüenza.  
El sol bajó ( durante el día) con la ayuda de Rashap. Esto significa  
que el señor será atacado por sus siervos.*<sup>3</sup>

Las crónicas astronómicas escritas en China en el siglo XI de nuestra era, también se suman a esta importante documentación histórica que nos permite ahondar en los secretos del universo. Por ejemplo, la fijación en el tiempo del origen de la nebulosa del Cangrejo, como resultado de una gran explosión estelar que ahora denominamos *supernova*, se debe a los apuntes que hicieron estos astrónomos orientales en el pasado<sup>4</sup>. Asimismo, las descripciones hechas por Tycho Brahe y Kepler sobre supernovas ocurridas en 1.572 y 1.604, respectivamente, han sido decisivas a la hora de ser fotografiados sus efectos y estados generales a mediados del siglo pasado por importantes observatorios astronómicos<sup>5</sup>. Esta rica tradición de escribir a mano con rigurosidad los resultados de las observaciones astronómicas, se extiende hasta finales del siglo XIX como labor rutinaria de los científicos. La presencia de la fotografía en las expediciones científicas por el mundo es, en gran medida, responsable de la pérdida de esta sana y creativa costumbre. Paulatinamente, las observaciones estrictamente visuales fueron apoyándose en una serie de artilugios técnicos que fueron invadiendo los observatorios. Relojes astronómicos y medidores de ángulos y de posiciones, ayudaron a sistematizar los apuntes y a plasmar en dibujos y bocetos los planetas y las estrellas. En contra de lo que se ha venido afirmando que la invención del reloj es una proeza exclusiva del Occidente del siglo XIV de nuestra era, existen pruebas fehacientes de que la cultura china fabricó relojes astronómicos entre los siglos VII y XIV de esta misma era, movidos por agua o mercurio, para ser aplicados al seguimiento y observación de los planetas<sup>6</sup>. Sin embargo, es el telescopio el que marca un antes y un después en la ciencia astronómica y en la forma de representar los fenómenos celestes. Galileo construyó en 1608 uno de los primeros de la historia con sus propias manos, perfeccionando el de Lippersheim, fabricado unos años antes. Con él estudió la luna, dejando para el futuro unos dibujos notables a lápiz, tinta y guash marrón, de las seis fases de nuestro satélite (Figura 6.1.). Entre otras estimaciones, pudo calcular la altura de los picos lunares a partir del estudio de sus



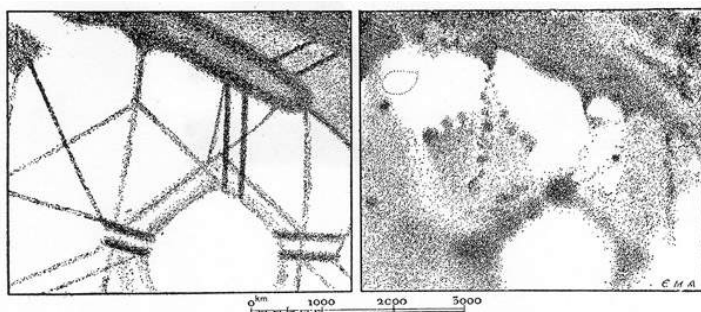
*Fig. 6.1. Seis fases de la luna. Lápiz y tinta marrón y guash marrón. Galileo Galilei. 1609- 10.*



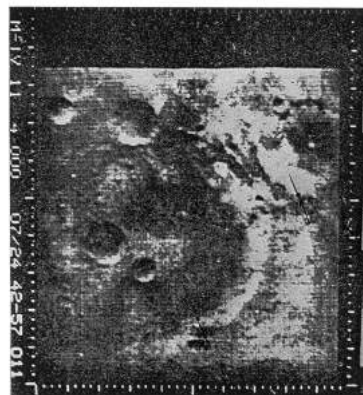
*Fig.6.2.. Cuatro dibujos de Mercurio durante nueve días, realizados con la ayuda de telescopios reflectores. Estudios sobre efectos de luminiscencia. Dale P. Cruikshank. 1963.*

días, sobreponiéndose a la presencia de múltiples formas de imagen tecnológica<sup>7</sup> (Figura 6.2.). Tanto el microscopio y el telescopio, como la cámara lúcida, han sido utilizados con profusión por dibujantes meticulosos, que han prestado un servicio inestimable a la ciencia<sup>8</sup>. Recordemos la labor de divulgación tan importante llevada a cabo por los grabadores del siglo XIX, inspirados tanto en los modelos al natural como en fotografías (ver Cap. 2.6.). En astronomía, destacan los dibujos de G. Schiaparelli, de los supuestos canales de Marte; o los de E. M. Antoniadi, que dedicó gran parte de su vida a dibujar numerosos astros, planetas y satélites. Las limitaciones de la técnica del dibujo aplicada a la ciencia astronómica vienen dadas fundamentalmente por su dependencia de la capacidad visual humana y de los instrumentos utilizados. En este sentido, no ha podido competir con las técnicas fotográficas y fotoeléctricas, que logran integrar la luminosidad de los objetos en periodos dilatados de tiempo a arbitrio de los astrónomos, y disponen de mayor sensibilidad ante la luz. Además, son instrumentos que pueden ser enviados con mayor facilidad a las cercanías de los objetos distantes, y están menos sujetos a la ilusión o a las interpretaciones subjetivas. Es bien conocido en los círculos astronómicos que las fotografías enviadas desde Marte en 1965 por la sonda espacial Mariner 4, sirvieron para certificar que los canales dibujados en su día por Schiaparelli, obedecían más a una ilusión óptica que a la propia realidad, hecho que quedó corroborado posteriormente con nuevas observaciones efectuadas con radiotelescopios terrestres<sup>9</sup> (Figura. 6.3. y 6.4.).

El telescopio ha sido desde Galileo el instrumento más importante para el avance de la astronomía, tanto en su versión reflectora como refractora. Desde el primer telescopio refractor de Galileo, se ha producido un continuo vaivén entre



*Fig. 6.3.. Dibujos de la región de los Eliseos, de Marte; hechos por G. Schiaparelli, entre 1877 y 1890 (izq.); descubridor de los canales; y por E. M. Antoniadi, entre 1909 y 1926 (dcha).*



*Fig. 6.4.. Cuadro 11 de una serie fotográfica de Marte, realizada por la Mariner 4. Imagen de vídeo. 1965.*

una forma y otra. En 1636 se comenzó la fabricación del primer telescopio reflector de acuerdo con las recomendaciones hechas por el mismo Newton. Pero no fue hasta 1720, que se logró construir un telescopio reflector realmente práctico, a manos de John Hadley<sup>10</sup>. A mediados del siglo XVIII, tanto uno como otro, se vieron beneficiados por la invención de las lentes acromáticas por John Dolland. El siguiente avance importante en telescopía se debe a William Herschel, que construyó a finales de este mismo siglo un telescopio reflector de 48 pulgadas de diámetro que gozó de gran prestigio dentro de la comunidad científica. Sin embargo, la técnica de construcción de este tipo de telescopios presentaba serias limitaciones, dado la necesidad de pulimentar continuamente los espejos y los metales reflectores utilizados. Este fue el caso del telescopio reflector de 72 pulgadas Earl of Rosse, construido en 1840, e inoperativo en repetidas ocasiones, debido a la extrema sensibilidad de su espejo ante los cambios de temperatura. Este tipo de problemas inclinó la balanza en favor de los refractores, que por entonces experimentaron una mejora notable en manos de Fraunhofer. A la pericia artesanal de este autor, se unió el avance producido en la técnica de fabricación de los cristales empleados en sus lentes, factor que contribuyó a que los refractores dominaran el escenario astronómico durante gran parte de este siglo. Sin embargo, fue la propia fotografía y el desarrollo de emulsiones más sensibles a la luz las que hicieron retomar la idea de fabricar nuevos telescopios reflectores. Qué duda cabe que las continuas mejoras en la fabricación de lentes y espejos, como resultado de nuevos procesos químicos y técnicas de vacío que permitieron la deposición de películas finas de plata o aluminio en los cristales, otorgaron una mayor luminosidad y acromatismo a este tipo de instrumento. En la primera mitad del siglo XX se produjeron grandes avances tecnológicos en el ámbito de la astronomía, con resultados importantes como la instalación en 1908 del telescopio reflector de 60 pulgadas del observatorio de Mt. Wilson, o los de 100 y 200 pulgadas, del observatorio Mt. Palomar, construidos en 1917 y 1948, respectivamente. En 1932, Bernhard Schmidt ideó una cámara que lleva su nombre, provista de objetivo gran angular, espejo reflector de gran apertura y una lente fina correctora de las aberraciones esféricas, que fue de gran utilidad a la hora de fotografiar grandes áreas del firmamento, para la confección de mapas estelares y para clasificaciones espectrográficas muy precisas de las estrellas.

La aplicación de la fotografía al estudio de los cuerpos celestes se llevó a cabo desde la invención del daguerrotipo. Las primeras fotografías de la luna, tomadas por John W. Draper en 1840, inauguraron un largo período de utilización de las emulsiones de sales de plata en astronomía, práctica que ha llegado hasta finales del siglo pasado, cuando han sido reemplazadas por los sensores de estado sólido. Este modelo instrumental mixto, de telescopía y fotografía se vio profundamente afectado a finales del siglo XIX por hechos tan decisivos como la ampliación del registro fotográfico a regiones del espectro no visible y por la llegada de los dispositivos fotoeléctricos. A su vez, la conjunción del telescopio, el espectroscopio y la fotografía inauguró la ciencia de la *astrofísica*, una rama de la astronomía de vital importancia en el desarrollo de la ciencia del pasado siglo, dedicada al estudio de la estructura física de los objetos celestes. Entrados en el siglo XX vuelve a producirse una serie de avances tecnológicos que afectan de pleno al estudio de los astros. Por un lado, comienzan a superarse las barreras impuestas a las observaciones efectuadas desde tierra, una vez que se desarrollan múltiples formas de transporte que hacen posible el desplazamiento de los instrumentos de observación a la proximidad de los objetos. Esta línea de actuación cubre desde simples globos a laboratorios espaciales y lanzamiento de cohetes y sondas. A un mismo tiempo, la aparición de la tecnología radio en los albores del siglo XX, abrió las puertas a la *radioastronomía*, disciplina que nació unida a la tecnología radar y a las radiocomunicaciones. En definitiva, una nueva era comenzaba gracias a la ayuda prestada por las técnicas fotográficas y fotoeléctricas, y por las nuevas tecnologías de las telecomunicaciones y de la información.



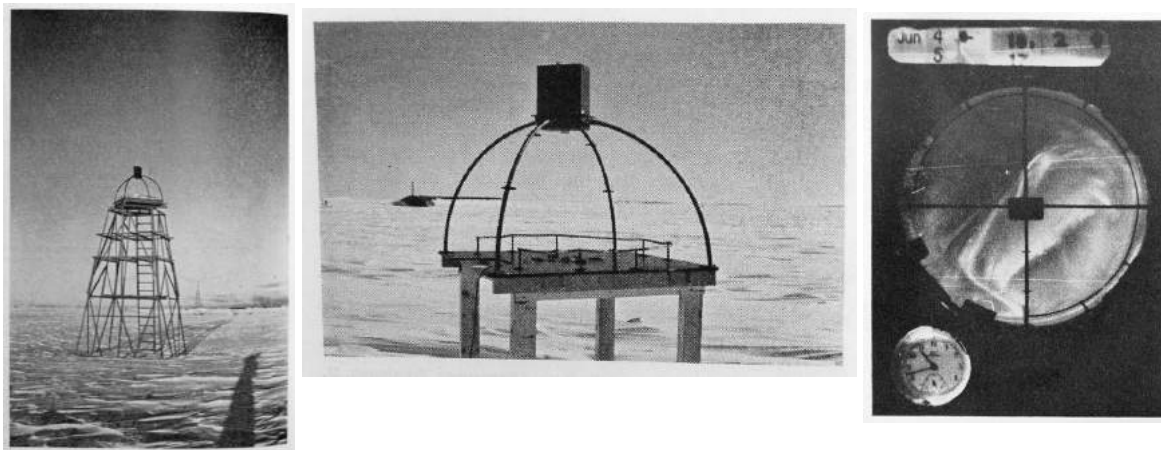


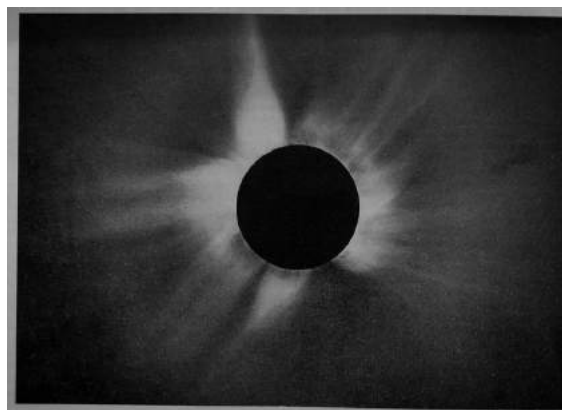
Fig. 6.5, 6.6., y 6.7. Cámara de 360° (All Sky Camera) para el estudio de las auroras boreales en Alaska. 1) Torre para evitar la interferencia de la nieve. 2) Detalle de la plataforma, donde se aprecia el espejo convexo circular; y 3) Fotograma, con los datos relativos a la fecha de exposición, y reloj de pulsera para la hora exacta. 1960.

Dentro del campo de las observaciones astronómicas realizadas desde tierra por los observatorios y por las expediciones enviadas a diferentes zonas del planeta, la tendencia general a lo largo del siglo XX, fue la paulatina sustitución de los métodos fotográficos convencionales por los dispositivos electrónicos, hecho que se vio favorecido por la llegada de los ordenadores a partir del final de la segunda guerra mundial. El hecho de que los instrumentos de observación electrónicos y los ordenadores hablen un mismo lenguaje, o que las operaciones de medición, clasificación y registro de los fenómenos estelares hayan buscado niveles de automatismo cada vez mayores, ha respaldado este proceso de cambio. Sin embargo, no hay que desestimar el papel desempeñado por las emulsiones fotográficas hasta fechas muy recientes, en cámaras acopladas a telescopios, expediciones, observatorios, vuelos espaciales y registros automatizados desde estaciones, sondas y cohetes. Cabe destacar dentro de estos últimos, el uso de cámaras de 360° (All sky camera), especializadas en el estudio de auroras boreales y fenómenos estelares y atmosféricos en zonas apartadas del planeta, normalmente en los polos ártico y antártico. Su diseño se caracterizó en su día por incluir espejos convexos y esféricos, capaces de recoger todo el hemisferio celeste y de proyectarlo en el iris de la cámara, mecanismos de relojería que permitían girar 360° a una velocidad determinada, rollos de película cinematográfica, normalmente de 16 mm, y relojes indicadores de la hora exacta de exposición<sup>11</sup>. (Figuras 6.5., 6.6. y 6.7.).

El material fotográfico destinado a la investigación astronómica experimentó un gran desarrollo y especialización a lo largo de los años. Las firmas comerciales más importantes de este sector abrieron líneas de productos especializados en estudios astronómicos, y ofrecían placas y películas específicas, fabricadas de acuerdo con la velocidad, latitud espectrales y contraste demandados por los científicos. Se producía material *ad hoc* para exposiciones prolongadas, para la captación de objetos fugaces como meteoros, o para fotografiar fenómenos muy particulares como la corona solar, o la línea espectral hidrógeno alfa, con la posibilidad de poderse adquirir material fotosensible manufacturado con revestimientos específicos, de acuerdo con las necesidades particulares de cada investigador<sup>12</sup>. Las emulsiones fotográficas convencionales han estado, por tanto, presentes en la mayoría de los proyectos astronómicos hasta la reciente aparición de la *fotografía CCD*. Los estudios realizados con telescopios emplazados en observatorios, llevados a expediciones, o los acoplados a sondas, cohetes o misiones espaciales, han contado con una fuerte participación de este tipo de



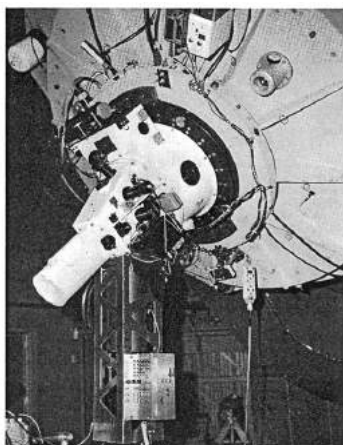
emulsiones. El estudio del eclipse de sol del 7 de marzo de 1970, o los sucesivos proyectos Apolo para la exploración de la luna son ejemplos de ello. Cabe destacar, dentro del gran despliegue de medios utilizados para el estudio de este eclipse, los numerosos observatorios repartidos por el mundo, el lanzamiento de cohetes, los vuelos tripulados, el uso de barcos, estaciones de radar y de expediciones oceanográficas, y de manera especial la serie de fotografías de la corona solar, realizada con medios convencionales por las distintas expediciones de astrónomos destinadas a zonas remotas y de gran altitud en nuestro planeta<sup>13</sup>. (Figura 6.8.).



*Fig. 6.8. Fotografía de la corona solar realizada en el eclipse del 7 de marzo de 1970, por una expedición a Yautepac, México. A una altitud de 8.000 pies.*

A su vez, los métodos fotoeléctricos comenzaron desde finales del siglo XIX a hacerse notar cada vez con más fuerza en las observaciones. La aplicación de las primeras células fotoeléctricas a los telescopios fue inmediata desde su invención, y sus formas más rudimentarias fueron pronto sustituidas por las nuevas células fabricadas con tecnología de tubos de vacío (ver Figura 4.10), y por los tubos fotomultiplicadores, utilizados preferentemente en fotometría estelar y espectrofotometría. Recordemos los ensayos de 1892, llevados a cabo en fotometría estelar por Minchin, Monck, Dixon y Fidgerald (ver cap. 4.2.1.). En estas operaciones, la fotografía de sales de plata quedó relegada a la determinación de posiciones y análisis descriptivo de los objetos celestes en la zona visible del espectro. En 1940, la confección del *Atlas fotométrico de Utrecht*, perteneciente a la franja de 3.330- 8.770 Å del espectro solar, se llevó a cabo mediante placas fotográficas calibradas y emplazadas en el telescopio y el espectrógrafo del observatorio Mt. Wilson<sup>14</sup>; en cambio, el estudio espectrométrico se realizó con tecnología fotoeléctrica capaz de hacer lecturas de las densidades y de distribuir las líneas espectrales en las placas y representarlas más cómodamente en gráficos. En suma, la fotografía fue utilizada preferentemente en operaciones clave como el registro de fenómenos observados en las regiones visibles y UV del espectro, de las radiaciones monocromáticas como la línea H $\alpha$ , ampliamente empleada en fotografiar el disco solar, y en la captación de objetos de movimiento muy rápido, como meteoros, normalmente con el uso de cámaras especiales tipo Super- Schmidt. Cabe destacar además, su utilización en estudios de la luna y de los planetas con técnica de superposición de negativos a fin de reducir el grano de las emulsiones y obtener mejores detalles de las superficies; en el registro de auroras boreales, cielos nocturnos, y luz zodiacal<sup>15</sup>; en la determinación de los tiempos y frecuencias relativos a los tránsitos de los cuerpos celestes por medio de técnicas como el PZT (Photographic Zenith Tube)<sup>16</sup>; o en la elaboración de atlas astrométricos. Por su parte, los métodos fotoeléctricos fueron destinados preferentemente desde un principio, a fotometría estelar, espectrofotometría especializada en el estudio individualizado de líneas espectrales, detección de detalles estructurales mínimos; así como en microfotometría aplicada a dispositivos de registro gráfico, fotometría de IR, y en la captación de fenómenos de escasa intensidad lumínica.

Sin embargo, la tendencia general durante este periodo de convivencia fue buscar fórmulas mixtas que supieran combinar la eficiencia cuántica de los dispositivos fotoeléctricos con la facilidad de la fotografía para registrar múltiples objetos a un mismo tiempo. A los métodos de Harlan Stetson y Jan Schilt, aplicados en fotometría estelar, o a los electronográficos -ambos comentados en capítulos



*Fig. 6.9. Espectrógrafo electrónico, 1974. Steward Observatory. Contiene en la parte inferior un detector de TV para la contabilización de fotones. 1974.*

anteriores (ver Cap. 5.1.3. y 5.1.4.)-, se sumaron multitud de experiencias híbridas que supieron aprovechar las emulsiones, tradicionalmente de mejor resolución y calidad de imagen, y la nueva tecnología de los tubos de imagen de TV, los convertidores e intensificadores de imagen y los nuevos sensores fabricados con materiales semi-conductores. En este orden de cosas, la instrumentación electrónica se ha distinguido por efecer con el tiempo mayor una compactibilidad de la instrumentación, hecho que ha abierto la puerta al uso de telescopios de tamaño más reducido, especialmente para tareas antes exclusivas de los grandes observatorios. Asimismo, ha potenciado una respuesta más lineal respecto de los diferentes niveles de iluminación y una mayor adecuación a las labores de contabilización de fenómenos por medio de técnicas de lectura y de almacenamiento compatibles con los ordenadores y con otros dispositivos de procesamiento numérico<sup>17</sup> (Figura 6.9.). La llegada de lo que hoy se denomina *astronomía CCD*, no hace más que confirmar esta tendencia hacia una atomización y democratización de las observaciones hasta límites

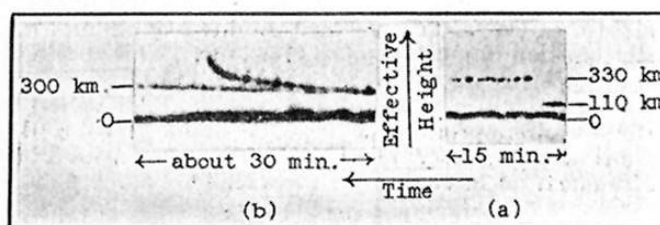
hasta ahora insospechados. Cabe mencionar que la primera imagen digital proporcionada por un sensor CCD en el ámbito de la astronomía pertenece al planeta Urano. Fue tomada en 1975 en el espectro del IR cercano, por Janesick y Blouke del Jet Propulsion Laboratory<sup>18</sup>.

### **6.1.1. El eco y la sombra. Del radar a las estrellas de la radio**

*No; eso es para oír el sonido de las estrellas*<sup>19</sup>.

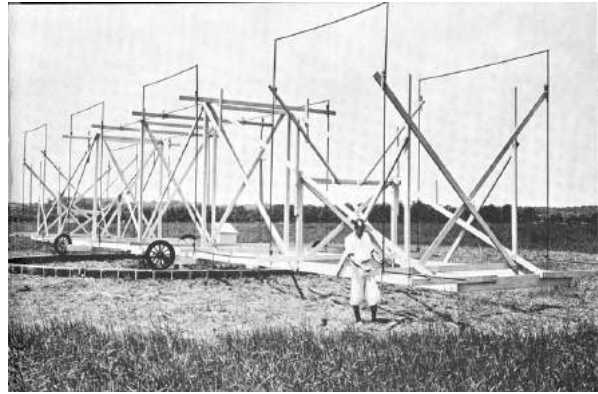
Michelangelo Antonioni

El protagonista del *Desierto Rojo*, tal vez debiera haber contestado “*para ver el sonido de las estrellas*” cuando fue preguntado por la función de aquellas grandes antenas radioastronómicas que aparecían en la escena de tan afamada película. A lo largo de estas páginas, hemos comprobado la capacidad que tiene la fotografía para reproducir de una forma visual las vibraciones del sonido, o las radiaciones pertenecientes a distintas longitudes de onda. La radioastronomía se apoya fundamentalmente en la cualidad que tienen las distintas técnicas de producción de imágenes para hacer observables y medibles los fenómenos que pertenecen al *espectro radio*. En los años anteriores a la segunda guerra mundial, los conocimientos acumulados en torno al fenómeno de la radioemisión tras las decisivas contribuciones de Henry, Feddersen y Hertz, dieron lugar a la creación de una nueva



*Fig. 6.10.. Registro fotográfico del eco producido por pulsos, relativos a la altura de la capa Heaviside. Los pulsos son enviados a un ritmo constante y son recogidos por un oscilógrafo, los picos son fotografiados en una película que avanza a razón de tres pulgadas por hora. White, E. L. C. 1932.*

instrumentación radio-electrónica, donde cabe destacar el radar. Fue el propio Marconi, el primero en esbozar hacia 1922 sus fundamentos teóricos. En los años siguientes a esta fecha, se llevaron a cabo las primeras mediciones de pulsos enviados a la ionosfera y los primeros ensayos de detección de aviones. En un artículo de 1932<sup>20</sup>, E. L. C. White reconoció la labor previa de una serie de autores, de gran ayuda para desarrollar un método de invención propia para el registro fotográfico de los ecos producidos por un generador de pulsos eléctricos. Los pulsos se enviaban hacia la capa Heaviside de la atmósfera, y sus señales de vuelta eran recogidas mediante un oscilógrafo. La película fotográfica se encargaba de registrar los picos de estos pulsos, avanzando a razón de tres pulgadas por hora (Figura 6.10.). En los años previos a la guerra ya existían varios modelos de radar en funcionamiento, mayormente en el ámbito militar. A un mismo tiempo, la radioastronomía hizo acto de presencia con las experiencias decisivas de Jansky y Reber, comentadas en capítulos anteriores (Cap. 4.1), al detectar el ruido de fondo, generado en alguna zona remota de nuestra galaxia. (Figura 6.11.).



*Fig. 6.11.. Jansky y la antena utilizada para detectar el fondo de microondas procedente de la Vía Láctea. Desmontada en 1944.*

### **6.1.2. La radioastronomía**

La radioastronomía se fundamenta en el hecho singular de que la generación de ondas de radio puede ser utilizada de la misma forma que la instrumentación óptica hace de la luz. Las velocidades de propagación a través del espacio son exactamente la misma para ambos fenómenos; por el contrario, la diferencia más notable radica en la forma en que podemos detectar su presencia. Mientras que nuestros ojos son capaces de distinguir diferencias mínimas entre diferentes longitudes de onda de luz, tal como sucede con los diferentes colores, o de discriminar puntos de luz situados muy próximos entre ellos, lo que se traduce en que nuestros ojos gozan de un poder de resolución espacial muy notable; en el caso de las ondas de radio, cuyas longitudes de onda se expanden desde un centímetro a varios kilómetros, nuestros sentidos son incapaces de captar sus radiaciones. De aquí, que necesitemos ciertos dispositivos que nos traduzcan esas señales en estímulos visuales o sonoros, como imágenes, figuras y sonidos en osciloscopios, placas fotográficas, papel dieléctrico, receptores de TV, galvanómetros acoplados a algún tipo de indicador de señales, auriculares, o mapas de radio.

*A partir de las observaciones realizadas durante la primavera de 1954 con el radio telescopio de la Universidad del Estado de Ohio, ha sido elaborado en detalle un mapa de radio del cielo. Este mapa (Figura 6.12.) contiene detalle suficiente como para hacernos ver cómo sería el cielo, si nuestros ojos fueran sensibles a las ondas de radio en la misma medida que lo son a las de la luz. La región central de nuestra galaxia o sistema de la Vía Láctea destaca notablemente, así como una serie de emisores de radio, bien localizados, como Casiopea A y Cygnus A .<sup>21</sup>*



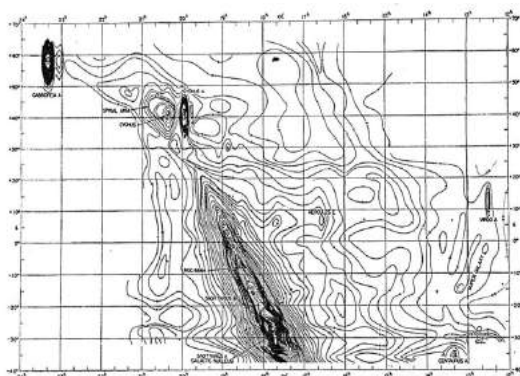


Fig. 6.12.. Radio mapa que muestra la luminosidad radio del cielo, donde se aprecia Casipoea A, Cygnus A y Sagitario A. 1955.

Dentro del espectro radio contamos con radiaciones de tipo térmico, originadas por el movimiento natural de los electrones e iones presentes en cualquier cuerpo o gas, y radiaciones no térmicas, producidas bien de forma artificial mediante osciladores eléctricos, tal como sucede con el radar o la radio, bien por determinados fenómenos naturales emisores de radiaciones muy intensas. Las primeras son piezas fundamentales para conocer el estado y las condiciones en que se encuentran cuerpos tales como satélites, planetas, o galaxias, y sus respectivas capas atmosféricas. El movimiento de las partículas presentes en estos cuerpos - electrones e iones

fundamentalmente-, genera una serie de ondas que pueden ser captadas por las antenas de radio, en el mismo modo que sus fotones pueden ser detectados por telescopios y placas fotográficas. Pero existen otras formas prácticas de estudiar el estado de los gases y de los cuerpos intergalácticos por medio de la tecnología radio. Entre los métodos más utilizados, hay que destacar el estudio de las cantidades de radiación que pueden absorber los cuerpos, el grado de polarización de las ondas que emiten (en este caso, es útil saber si son coherentes o no), si presentan el *efecto de rotación Faraday*, consistente en el cambio de la polarización original como resultado de haber pasado a través de algún campo magnético próximo a la fuente de la radiación; o también, a partir del estudio de la *radiación sincrotrón*, producida por electrones que se mueven a velocidades próximas a la luz<sup>22</sup>, y cuyos efectos se hacen patentes en el ensanchamiento de las líneas espectrales. Un camino adicional lo constituye el *efecto Compton inverso*, en el que se comprueba cómo estos electrones superveloces o relativistas, producen fotones de frecuencias más altas, fruto de esta colisión, efecto que se traduce en la formación de radiaciones visibles o de rayos X. El análisis de los espectros de radio es otra de las técnicas más utilizadas. Como ocurre con los espectros ópticos, éstos pueden ser de emisión y absorción, siendo muy característico entre estos últimos, la *línea de radio de 21 cm* del átomo de hidrógeno, que guarda un papel muy destacado en los estudios de radioastronomía dada la fuerte presencia de este elemento en las galaxias. La espectroscopía de radio proporciona también información de gran valor acerca de las velocidades y estado de rotación de los cuerpos mediante el estudio del efecto Doppler, de la composición molecular de las galaxias, o de la presencia de radiación máser.

### 6.1.3. Ondas de luz, ondas de radio

La mayoría de estos procedimientos se traduce en resultados visuales que a veces nos recuerdan las imágenes producidas por medios ópticos. Si en los telescopios reflectores convencionales contamos con un espejo reflector que concentra los haces de luz hacia un punto focal que proporciona una imagen susceptible de ser vista y fotografiada; en los radiotelescopios, disponemos de una antena que recoge las ondas y las envía a un receptor de radio, capaz de traducir las

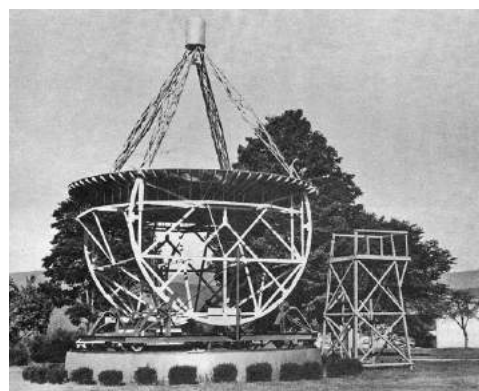


Fig. 6.13.. Radiotelescopio de Grote Reber.



señales en imágenes con la ayuda de diversos dispositivos electrónicos. Dada la extrema longitud de las ondas de radio y su escasa energía, es necesario antenas de gran tamaño que permitan la captación de haces de ondas con un máximo de energía y lo más finos posible, a fin de obtenerse un poder de resolución aceptable. Normalmente, se debe llegar a un grado de compromiso entre estos dos valores relativos a la longitud de onda y a la intensidad de las emisiones, por ir uno en detrimento del otro<sup>23</sup>. Desde la primera radioantena construida por Grote Reber en el jardín de su casa, de 9 metros y medio de diámetro (Figura 6.13.), se pasó en pocos años a antenas de 76 y 300 metros, como las de Jodrell Bank, o la de Arecibo, respectivamente (Figuras 6.14. y 6.15.) La posibilidad de estudiar los fenómenos de radio a partir de las interferencias producidas por los distintos frentes de ondas, o por medio de aperturas sintéticas, llevó a los



*Fig. 6.14.. Radiotelescopio de 76 metros de diámetro. Jodrell Bank Univ. Manchester. 1957.*

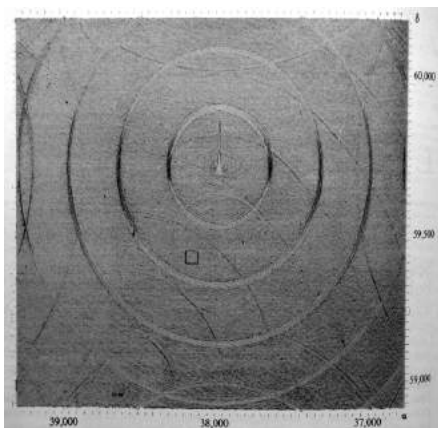


*Fig. 6.15.. Observatorio de Arecibo, con la radioantena de 100 metros de diámetro, emplazada en el propio terreno.*

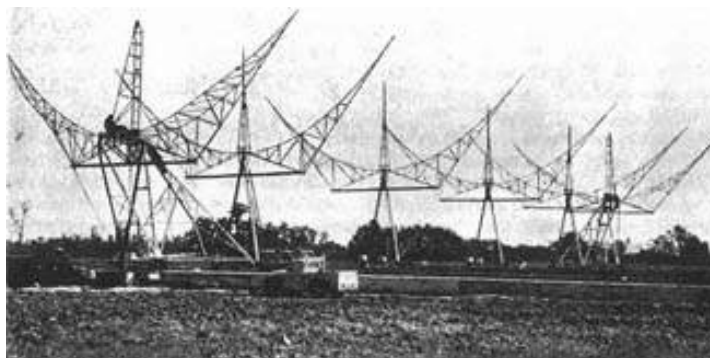
observatorios a construir entramados de antenas que han llegado a cubrir longitudes de kilómetros, y superficies de varias hectáreas. Estas dimensiones son necesarias, debido a que los métodos interferométricos precisan de dos o más antenas para recoger de forma combinada los haces de ondas correspondientes, y poder así transmitirlos al receptor que se encarga de su procesamiento y de presentar los resultados en forma de franjas de interferencias. En este contexto, cabe resaltar la posibilidad de generar imágenes de síntesis en forma de gráficos o mapas mediante el procedimiento de *síntesis de Fourier* (Figura 6.16.). La observación de determinados objetos o fuentes estelares, mediante un interferómetro que recoge la información proveniente de dos antenas, nos proporciona las diferentes *ondas seno* de diferentes amplitudes y fases. Este procedimiento matemático permite la integración de todas ellas, proporcionando información relativa al objeto, de forma similar a si hubiéramos utilizado una sola antena de una apertura equivalente a la distancia que media entre las antenas utilizadas<sup>24</sup>. De este modo, se pueden conseguir aperturas de síntesis con la utilización de una parrilla de múltiples antenas, cuyas señales son integradas convenientemente. La interferometría de radio es esencial para la identificación exacta de la posición de un cuerpo estelar, o para conocer la estructura del mismo (Figura 6.17). Lo primero denota un poder de resolución enorme, que es utilizado normalmente para determinar la ubicación óptica del objeto, y hacer posible su registro fotográfico. En la década de los sesenta,, la tecnología radio, contra todo pronóstico, ya había superado el poder de resolución de los telescopios ópticos.

*En estos momentos, la interferometría de radio ha avanzado hasta conseguir una resolución de un milisegundo de arco ( $0''.001$ ). Para comprender lo pequeño que esto significa, imagine el ángulo comprendido por una pelota de golf a una distancia de 6.000 km: ¡aproximadamente la distancia entre Londres y Nueva Yorkj.<sup>25</sup>*

Para conseguirse esta proeza se utilizaron redes de antenas repartidas por varios continentes, pudiéndose integrar la información a tales distancias mediante osciladores atómicos, productores de frecuencias muy estables, redes de telecomunicaciones por cable y por ondas para la transmisión de los datos, dispositivos de registro electromagnético, y ordenadores capaces de procesar la información resultante. El VLBI (Very Long Baseline Interferometer), puesto en funcionamiento en 1967, fue la primera red de este tipo, con capacidad de resoluciones de estas dimensiones.



*Fig. 6.16. Imagen de síntesis de una galaxia, tras 12 horas de recogida de datos de radio. 1971.*



*Fig. 6.17. Observatorio astronómico Mullard, de Cambridge. Antenas móviles para estudios de interferometría. 1957.*

#### **6.1.4. Astros, estrellas y planetas**

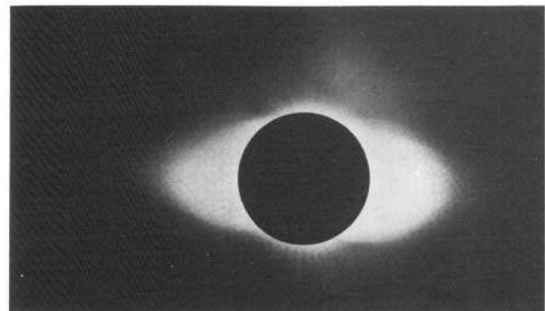
Para el estudio de los planetas desde la tierra, se han utilizado fundamentalmente técnicas de medición y observación pertenecientes a los espectros visible, de IR y de radio. En el primer caso, se estudian los cuerpos a partir de la luz solar que reflejan, y que es captada convenientemente por los telescopios convencionales. La limitación de este tipo de metodología viene dada fundamentalmente por la existencia de atmósferas muy densas que impiden una observación directa de las superficies de los planetas. Esta es la razón por la que se toman rutas alternativas, como medir la radiación térmica que emiten en el espectro de IR mediante detectores *ad hoc*, acoplados a los telescopios; o mediante observaciones de radio, que superan a las anteriores al ser capaces de atravesar las densas capas de nubes atmosféricas, penetrando incluso en zonas superficiales de las cortezas planetarias, al tiempo que extienden su ámbito de estudio a las galaxias remotas. La combinación de estos tres tipos de observaciones, a las que debemos añadir las proporcionadas por el radar, ha permitido un gran avance a la astronomía de nuestros días.

En los cuerpos celestes más próximos a la tierra, como es el caso de la luna, las primeras señales de radio fueron detectadas por Dicke y Beringer en 1946, en ondas de un centímetro. Estudios radiométricos posteriores mostraron que estas emisiones llevaban un retraso de varios días respecto de las fases lunares, lo que fue atribuido al calentamiento y enfriamiento graduales de la superficie lunar y al tiempo que tardaban en ser captadas por las antenas receptoras. Las características térmicas, conductoras y físicas de la superficie lunar, determinadas por estas observaciones radioastronómicas, y completadas con las imágenes topográficas y estructurales proporcionadas por las técnicas de radar, fueron decisivas para el posterior envío de sondas y vuelos tripulados a nuestro satélite.

Los estudios de radio se extendieron sin demora a los planetas del sistema solar. En el caso de Venus, las primeras mediciones de su radiación térmica las llevó a cabo Mayer en 1956, sorteando su densa capa de nubes, obstáculo infranqueable para las observaciones ópticas. Estudios espectroscópicos de IR completaron esta información, dando a conocer un efecto invernadero muy pronunciado por la fuerte presencia de CO<sub>2</sub> en su atmósfera, hecho constatado años después por las primeras sondas enviadas a sus proximidades. Las primeras observaciones de radio realizadas sobre Mercurio se llevaron a cabo en 1961. A pesar de las grandes interferencias producidas por su proximidad al sol, se pudo determinar su temperatura media. A su vez, observaciones de radar permitieron conocer el tipo de rotación de este planeta y la presencia de cráteres semejantes a los de la luna, algo que fue corroborado fotográficamente en 1974-5 por la nave Mariner 10. Por otro lado, fueron también observaciones de radio las que lograron determinar las temperaturas de planetas como Marte y Júpiter, y las que proporcionaron información acerca de sus rotaciones o de la presencia de zonas de gran importancia para el envío posterior de misiones espaciales. En el caso de Júpiter, las primeras observaciones de radio se hicieron en 1955, a raíz de una serie de interferencias detectadas en su presencia, dependientes de su estado de rotación. En años sucesivos, se realizaron mediciones en diferentes longitudes de onda, lo que proporcionó información más en detalle del tipo de emisiones, su temperatura, rotación, acerca de ciertas explosiones características de su atmósfera turbulenta, etc. Conclusiones similares, se llevaron a cabo respecto de Saturno, Urano y Neptuno, de los que se comenzó a conocer su temperatura, rotación y la composición de sus atmósferas y de sus cortezas más superficiales. La técnica de interferometría por microondas fue decisiva para el conocimiento de los anillos de Saturno. Y las emisiones de radio también sirvieron para detectar con precisión los cambios drásticos de temperatura de Urano.

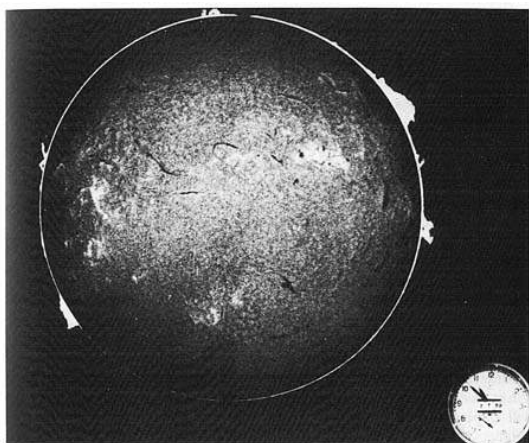
En el caso del sol, fueron las estaciones de radar utilizadas durante la II Guerra mundial en Inglaterra, las primeras en detectar fuertes emisiones de radio procedentes de este astro. Hey atribuyó estas tormentas a la presencia de determinadas manchas solares en el disco solar. En 1942, fueron detectadas emisiones de rayos cósmicos procedentes del sol en Estados Unidos, coincidiendo con una fuerte fulguración, así como emisiones de radio en longitudes de onda de un centímetro en condiciones normales del astro. El

estudio radiométrico del sol presenta ventajas considerables respecto de su estudio óptico, dado la gran intensidad y peligrosidad de sus radiaciones para una observación directa. Los estudios ópticos se han llevado a cabo normalmente con el uso de filtros y de espectroscopios, lo que ha sido determinante para desvelar datos sobre sus manchas, modo de rotación y sus ciclos. Esta es la razón de que los eclipses sean muy aprovechados en el estudio de este astro, especialmente cuando la interposición de la luna permite el estudio de su cromosfera, o franja de la atmósfera solar de color rojizo, muy cercana a su superficie; y de la corona solar, o franja de la atmósfera más alejada del sol, que se nos presenta como un resplandor blanco muy intenso (Figura 6.18.). En este mismo ámbito, los estudios espectroscópicos, basados en el efecto Zeeman, o en el análisis de la línea alfa del hidrógeno (H $\alpha$ ), elemento de mayor presencia en la atmósfera solar, han sido esenciales para conocer los estados magnéticos de las manchas solares, las áreas de gran luminosidad alrededor de éstas, conocidas como *playas*, y para el estudio de las *erupciones solares* (solar flares), de sus *relieves* (prominences) y de la



*Fig. 6.18. Fotografía de la corona solar tomada durante un eclipse.1983*

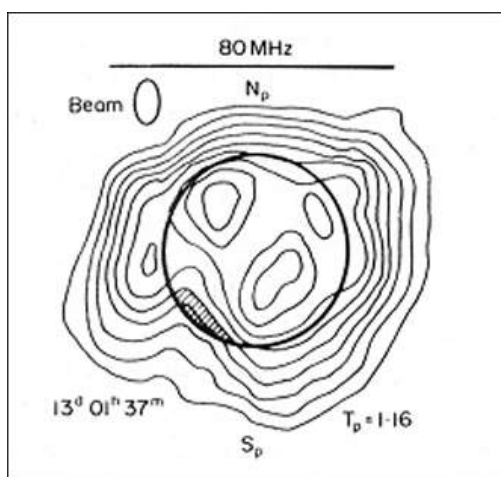




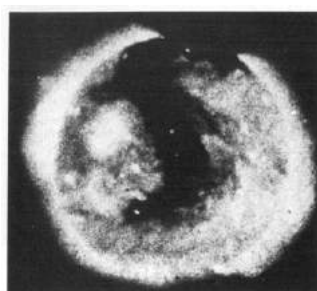
*Fig. 6.19.. Fotografía del Sol en luz de hidrógeno, que muestra las manchas, prominencias y cromosfera solares. 1983.*

cromosfera (Figura 6.19). Las tormentas magnéticas que suelen acompañar este tipo de fenómenos, desencadenan intensas radiaciones UV y de rayos X, interferencias en las radiocomunicaciones y efectos atmosféricos como auroras boreales. Las observaciones de radio han sido determinantes para conocer la densidad electrónica y la temperatura en diferentes capas de la atmósfera solar, y para conocer este astro en condiciones ajenas al acontecimiento de un eclipse. Dependiendo de las longitudes de onda utilizadas, se puede obtener información acerca de las zonas más o menos alejadas de la superficie solar. Mientras que las ondas de un metro nos dan a conocer zonas pertenecientes a la corona solar, las de milímetros se originan en las

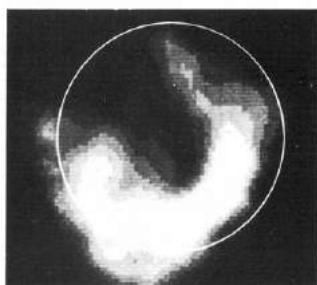
partes más bajas de la cromosfera. Los mapas de radio, en este sentido, complementan de forma visual la información proporcionada por otro tipo de observaciones ligadas a otras regiones del espectro: rayos X y visible, fundamentalmente. (Figuras 6.20. y 6.21).



*Fig. 6.20.. Mapa de radio de la corona solar, a 80 Mhz. Longitud de onda de 3.5 metros. Tomada con el radio- heliógrafo de Culgoora. 1972.*



*Fig. 6.21. Imágenes de radio (160 Mhz) y de rayos X que muestran un hueco en la corona solar. Obtenidas con el radioheliógrafo de Culgoora (1973); y con el telescopio de rayos X del Skylab, respectivamente. 1980.*

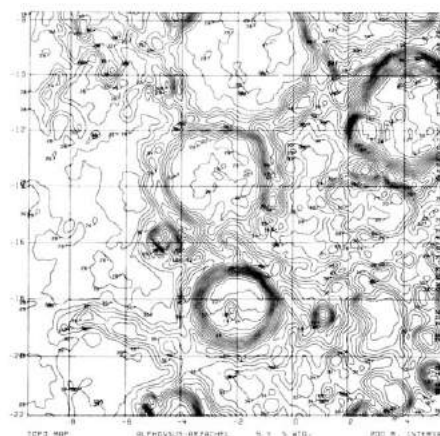


Para el estudio de los fenómenos fugaces y de intensidad variable, propios de la actividad solar, las técnicas terrestres como el radioheliógrafo, fueron de vital importancia durante muchos años, aportando mapas e imágenes de la situación relativos a un período breve de tiempo. En estos casos, se combina la información procedente de varias antenas mediante el procedimiento de *apertura de síntesis*, acelerándose el proceso con la ayuda de ordenadores. Los fuertes estallidos de emisiones de radio que suelen acompañar las erupciones solares, son reproducidos en imágenes que complementan las observaciones ópticas. Mientras que éstas dependen en mayor medida de las condiciones atmosféricas o de las diferentes temperaturas existentes, en las observaciones de radio el factor más determinante es la densidad electrónica interplanetaria. (ver Figura 6.12)



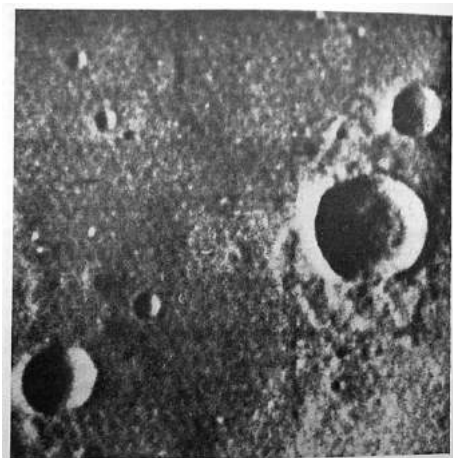
### 6.1.5. El radar

Por su parte, la tecnología de radar comenzó a ser aplicada con mayor intensidad en astronomía tan pronto concluyó la guerra, de manera especial, en investigaciones sobre lluvias de meteoros y en la detección de señales de eco procedentes de la luna. La mayor utilidad de esta técnica es para conocer la distancia que nos separa de los objetos, y sus velocidades, estando limitada al estudio de objetos próximos, situados en nuestro sistema solar. Esta doble información se obtiene a partir del análisis del tiempo empleado por las señales emitidas en su camino de ida y vuelta hasta los objetos, y por el efecto Doppler, o cambio que se produce en las frecuencias pertenecientes a las señales reflejadas por los objetos. Adicionalmente, la diferencia detectada en las intensidades de las señales proporciona información sobre las características topográficas de las superficies de los cuerpos, tal como ocurre con la luz que es dispersada de forma desigual por un objeto, y que se traduce en una imagen óptica de un cuerpo de mayor o menor rugosidad. Mediante técnicas interferométricas, que combinan las señales de dos estaciones de radar, se puede conseguir una gran resolución, no sólo respecto de los detalles de una superficie, sino también de sus diferentes alturas. Las imágenes por interferometría, en forma de *mapas de contorno*, por ejemplo, conseguidas por los radiotelescopios más avanzados de la época, equipados de receptores menos ruidosos, tecnología maser y de técnicas informáticas de integración de datos, fueron determinantes en el estudio de la luna y de la mayoría de los planetas (Figura 6.22. y ver Figura 4.9)



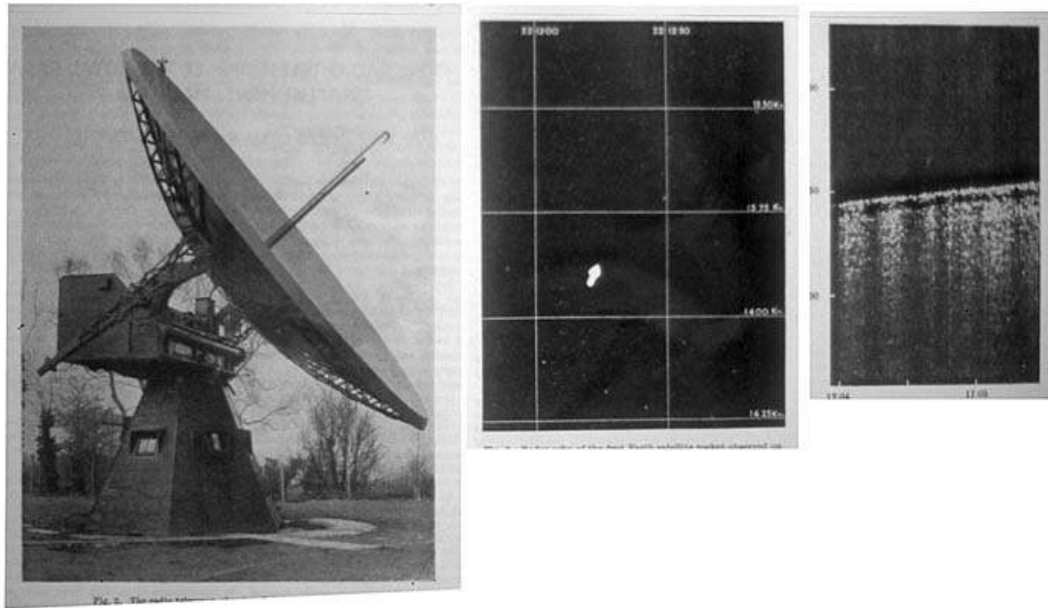
*Fig. 6.22.. Mapa de contorno de alturas por radar de la región lunar que muestra la Fig. 4.9. 1983.*

El rigor y la precisión obtenidos con la tecnología de emisión y recepción de pulsos de radar contribuyeron a principios de los sesenta, a sustituir la escala utilizada hasta entonces, para las *unidades de distancia astronómicas* (A. U. Astronomical Units) por otra más afín con con este tipo de tecnología. La determinación de la distancia entre Venus y la Tierra, realizada con esta técnica,



*Fig. 6.23. Imagen de radar tomada por el Mariner 6 en su aproximación a Marte. Los cráteres son de diámetros de 3 a 4.5. millas. 1969.*

fue crucial para la aceptación de esta propuesta. El eco de radar nos ofrece, por tanto, información sobre la distancia exacta a la que se encuentran los objetos celestes, y datos adicionales relativos al modo de rotación, las características de la superficie, o la altura y algunas propiedades de los accidentes geográficos. Es emblemático el caso de Mercurio, con el que se subsanaron malinterpretaciones ópticas acerca de su rotación con tecnología de ecos de radar. Las posibilidades de esta técnica se incrementaron notablemente a partir de la instalación de radares en las naves y del envío de sondas al espacio (Figura 6.23.). Estos procedimientos que se completaron con el estudio de cuerpos veloces como los meteoros por medio del análisis de sus estelas, en forma de columnas ionizadas, capaces de reflejar las señales de

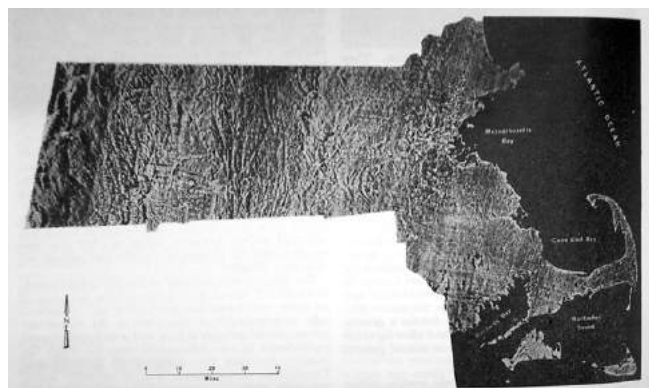


*Fig. 6.24.. Radiotelescopio y radioecos del Sputnik, y de la luna en su movimiento de alejamiento del radar, respectivamente. 1957.*

eco del radar. Estos avances fueron decisivos para elegir esta técnica en el estudio de los meteoros o de los primeros satélites artificiales enviados por el hombre al espacio, especialmente, en periodos de luz de día cuando estos fenómenos son inaccesibles a los medios ópticos (Figura 6.24.). En un sentido inverso, se han realizado estudios de la corteza terrestre por metodología de radar con equipos instalados en aviones y en satélites artificiales, demostrando ser una herramienta de gran valía para el estudio topográfico y de reconocimiento. (Figura 6.25.). Las técnicas sismográficas y de sónar están íntimamente relacionadas con la de radar; pero he preferido, por razones expositivas, incluirlas en el apartado de la imagen de los objetos en movimiento. (ver Cap. 6.3.3.4.).

### **6.1.6. Galaxias, nebulosas, novas y supernovas**

En el estudio de las galaxias, la radioastronomía ha proporcionado un avance muy significativo, complementando los estudios ópticos previos. Sobresale en este contexto, el conocimiento al que se ha llegado sobre Andrómeda, una de las galaxias observables a simple vista desde la Tierra. En un primer momento, su forma fue identificada por medios ópticos como una figura plana en forma de disco en espiral; pero pronto saltó a relucir la imprecisión de estas observaciones, debido a la interposición de polvo cósmico. Las radio-observaciones dieron un gran impulso a estos estudios, dado que no se ven afectadas por la presencia de este tipo de nubosidades intergalácticas. A partir de 1950, se pudo detectar de



*Fig. 6.25..Vista del estado de Massachusetts compilada de imágenes de radar, obtenidas a una altitud de 7.000 pies. 1969.*

forma precisa la posición y estructura de Andrómeda con radiotelescopios, convirtiéndose en la primera fuente de radio detectada en un objeto situado fuera de nuestra galaxia<sup>26</sup>. Por su parte, la espectroscopía de radio respaldó resultados de este tipo con el descubrimiento de la línea espectral del átomo de hidrógeno, en una longitud de onda de 21 cm, lo que aportó claves decisivas para el conocimiento de la estructura y el movimiento galácticos. La existencia de la línea espectral del átomo de hidrógeno fue vaticinada como hipótesis por van de Hulst en 1945, al defender que esta línea debía ser encontrada en nuestra galaxia por la presencia masiva de este elemento en ella. Y efectivamente, esta línea espectral fue detectada en 1951, marcando el inicio de una serie de estudios sobre sus cualidades y movimientos, tanto en el hemisferio norte como sur; estudios que culminaron en imágenes reveladoras de la estructura en espiral de nuestra galaxia.



*Fig. 6.26.. Mapa de radio de la nebulosa de Andromeda, hecho con el telescopio de una milla de Cambridge; y superimpuesto a una fotografía óptica. 1969.*

Existe una serie de nebulosas dentro de nuestra galaxia, en forma de aglomeraciones de estrellas que, a simple vista, se ven como puntos de luz difusos y borrosos. Algunas de ellas pertenecen a nuestra galaxia, como es el caso de Orión o del Cangrejo; otras, en cambio, como Andrómeda, son externas aun cuando pueden ser distinguidas desde la Tierra. En el estudio de las nebulosas, las observaciones ópticas y de radio han sabido conjugarse de forma magistral para ahondar en nuestro conocimiento sobre el universo (ver Figura 6.12.). Las fotografías proporcionadas por los telescopios y por los patrones espectrales, han sido completados por imágenes provenientes de la tecnología radio, mapas de contorno y análisis espectroscópicos fundamentalmente (Figura 6.26.). En el caso concreto de las nebulosas de Orión y del Cangrejo, las observaciones ópticas y de radio han proporcionado información de gran valor acerca de su composición, tamaño, estructura, distancia, velocidad de alejamiento, grado de expansión, o densidad y temperatura electrónicas. Todo ello ha reforzado la idea de que este tipo de sistemas son vestigios de grandes explosiones estelares ocurridas en el pasado, fenómenos conocidos en la actualidad con los nombres de *novas* y *supernovas*, dependiendo del grado de intensidad de sus manifestaciones. El origen de estos descubrimientos se remonta a 1948, cuando fueron detectadas emisiones de radio muy intensas, procedentes de un cuerpo de nuestra galaxia que, tras ser posicionado con gran precisión mediante técnicas interferométricas, resultó ser la nebulosa del Cangrejo. El hecho coincidió con observaciones ópticas realizadas previamente mediante telescopio. Estudios posteriores de este tipo de nebulosas llegaron a la conclusión de que las radiaciones no térmicas, tan intensas, detectadas con los radiotelescopios eran debidas a la presencia de electrones de gran energía y altamente acelerados por la presencia de fuertes campos magnéticos, fenómeno que se conoce como *radiación sincrotrón*. A partir de la década de los sesenta, se pudo extender este tipo de estudios a la región del espectro de los rayos X, mediante cohetes y naves enviados al espacio. De este modo, se comprobó que la radiación X emitida por estos cuerpos se debe también a la presencia de procesos sincrotrones. La información ha sido completada con los mapas de polarización relativos a las radiaciones presentes en este tipo de fenómenos, y con datos sobre la presencia y características de los campos magnéticos situados en las fuentes y en los cuerpos y gases encontrados a su paso (Figura 6.27.).



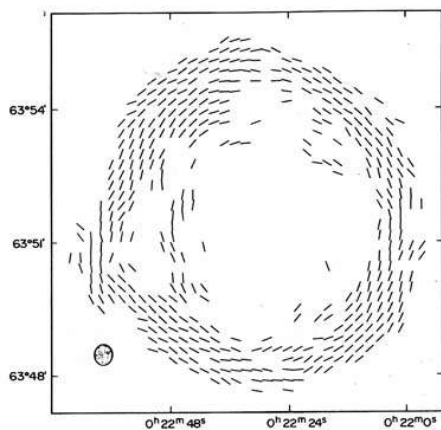


Fig. 6.27. Mapa de polarización (campo eléctrico) de la supernova Tycho Brahe, a partir de observaciones de radio. 1983.

El campo de investigación de los radioastrónomos se extendió con los años hacia otras galaxias. Desde el siglo XIX, las observaciones con telescopio revelaron agrupaciones de estrellas que fueron denominadas *nebulosas blancas*, pronto identificadas como sistemas pertenecientes a otras galaxias, formados por estrellas en forma de disco en espiral. A partir de los años veinte del pasado siglo, Hubble fotografió numerosas nebulosas con la ayuda de un telescopio de 2.5 metros, confirmando que la mayoría de ellas pertenecían a galaxias más allá de la nuestra. La propia Vía Láctea, galaxia a la que pertenecemos, fue interpretada también en forma de disco. Posteriores observaciones y fotografías tomadas con telescopios de hasta 5 metros de diámetro revelaron la existencia de miles de millones de galaxias, distantes miles de millones de años luz. Estas fueron catalogadas

conforme a su forma irregular, en espiral o elíptica, o de acuerdo con el tipo de distribución de sus agrupaciones de estrellas (clusters) (Figura 6.28.). Estos avances de naturaleza óptica se completaron con observaciones radioastronómicas, que sirvieron para catalogar las galaxias de forma más precisa, de acuerdo con la energía total emitida en determinadas franjas del espectro radio. Incluso algunas de ellas, como la Cygnus A, al presentar emisiones de radio tan intensas, superiores a los flujos detectados ópticamente, pasaron a denominarse *galaxias radio*. Dada la distancia tan enorme que nos separan de este tipo de galaxias, fue preciso posicionarlas previamente con técnicas interferométricas para proceder a su registro fotográfico, labores que normalmente se realizaban con la ayuda de grandes telescopios y tiempos de exposición muy largos. Por tanto, mientras que la tecnología radio ayudó a la detección de este tipo de objetos estelares, su identificación óptica nos dio a conocer con exactitud la distancia que nos separa de ellos, su localización y sus energías radiantes. El desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales de una determinada galaxia, interpretado por Hubble como una señal de la distancia que nos separa de ella, es una de las herramientas más utilizada en este sentido, y punto de partida de la hipótesis de que nuestro universo se expande irremisiblemente. Los espectros, la distribución de radio, la imagen óptica y el estado de polarización de las radiaciones procedentes de las galaxias ofrecen una visión general y detallada de este tipo de objetos.

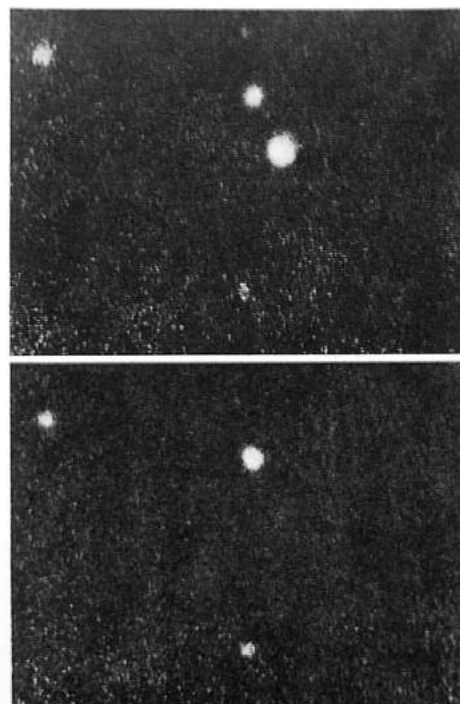


Fig. 6.28. Radiofotografía de la galaxia NGC 1265. 1972.

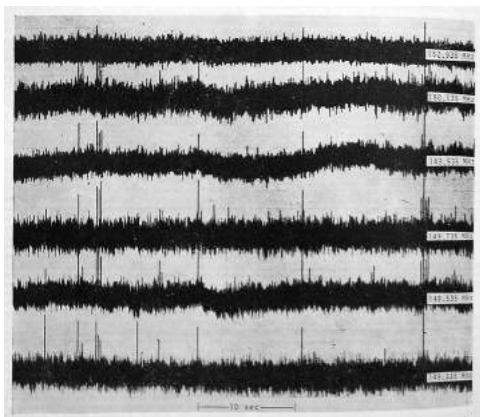


### 6.1.7. Púlsares y agujeros negros

Las radio- observaciones asociadas a la tecnología de generación de pulsos, dieron resultados muy fructíferos a partir de la década de los sesenta culminando con el descubrimiento de los púlsares. Mediciones realizadas de una serie de fuentes radioastronómicas pusieron de manifiesto una serie de pulsos que se producían con una periodicidad y velocidad determinadas, y que no eran atribuibles a interferencias o a causas conocidas. Los análisis pormenorizados de Jocelyn Bell determinaron su procedencia galáctica, lo que despertó la curiosidad de la comunidad científica acerca de su origen y condición, atribuidos en un principio a la acción de seres extraterrestres. Los primeros púlsares fueron detectados en 1967, como resultado de una serie de investigaciones realizadas por el Observatorio Radioastronómico de Cambridge<sup>27</sup>. A principios de los ochenta, ya se contaba con un número de púlsares identificados por encima de trescientos, atribuyéndose su origen a estrellas de neutrones, emisoras de rayos muy concentrados de ondas de radio a un ritmo constante y a velocidades muy elevadas. Estas observaciones de radio fueron respaldadas por observaciones ópticas llevadas a cabo en 1969 por varios observatorios repartidos por el planeta, estableciéndose como fuente de estos pulsos el centro de la nebulosa del Cangrejo; concretamente, en una estrella doble considerada una secuela de la supernova que dio origen a tal nebulosa<sup>28</sup>. El observatorio Lick de la Universidad de California, obtuvo numerosas fotografías a partir de una combinación de técnicas electrónicas de captación de imágenes. En primer lugar, utilizaron un fotómetro fotoeléctrico, cuya salida fue registrada por un analizador multiescala. Para localizar más estrechamente este tipo de pulsos ópticos, se utilizó posteriormente un intensificador de imagen acoplado a una cámara de televisión provista de un disco rotatorio a modo de obturador mecánico, capaz de diseccionar los pulsos recibidos. El conjunto de estos dispositivos fue acoplado, a su vez, al telescopio de 120 pulgadas de dicho observatorio. Y toda esta información se pudo visualizar en un monitor de TV, grabándose las imágenes en cintas magnéticas de vídeo. Cuarenta y seis fotografías de este pulsar fueron tomadas posteriormente a partir de la reproducción de estas cintas, lo que sirvió para catalogarlo como el NP 0532 (Figura 6.29.). Curiosamente, el estudio comparativo de estas fotografías con otras tomadas en 1899 por Crossley, demostraron niveles muy similares de brillo, a pesar de las dificultades de comparar emulsiones fabricadas en tiempos y con respuestas espectrales tan dispares<sup>29</sup>. Estos descubrimientos pusieron de manifiesto la existencia de estrellas emisoras de luz en forma de pulsos, y no en continuo como se suponía desde hacía cien años. En 1968, se registraron las primeras líneas espectrales de una serie de púlsares con la ayuda del telescopio de Parkes de 210 pies de diámetro<sup>30</sup>. La combinación de técnicas electrográficas y fotográficas proporcionaron las primeras imágenes de este tipo de fenómeno (Figura 6.30.). Con el tiempo, los púlsares fueron detectados en regiones del espectro pertenecientes a rayos X y rayos  $\gamma$ , presentando muchas similitudes con los ópticos y de radio. El perfeccionamiento de la tecnología de generación y detección de



*Fig. 6.29. El púlsar NP 0532 fotografiado a partir de una imagen de TV. 1969.*



**Fig. 6.30. Registro de señales del púlsar CP 0950 en un grabador UV. 1968.**

pulsos ha redundado en el descubrimiento de nuevos púlsares en la escala de los milisegundos, probablemente debidos a estrellas de neutrones de *velocidades spin* altísimas, y de enorme producción de energía rotacional.<sup>31</sup>

Normalmente, las estrellas emisoras de rayos X obedecen a sistemas binarios, formados, por lo general, por una estrella observable por medios diversos, y una estrella compañera, invisible. Las diferencias de masas detectadas en estas estrellas binarias ha llevado a los astrónomos a considerar la existencia de *agujeros negros* en el espacio, o espacios capaces de absorber toda la luz que existe a su alrededor, como consecuencia de

la existencia de un campo gravitacional muy intenso, producido por una estrella. La detección de Cygnus X-1 en esta región del espectro de rayos X coincidió con la captación por técnicas interferométricas de una estrella asociada, que respondía a la descripción de un agujero negro. Las premoniciones teóricas nuevamente se adelantaron a las observaciones, alimentando la disputa entre los físicos teóricos y experimentales.

*Los agujeros negros son un caso, entre unos pocos en la historia de la ciencia, en el que la teoría se desarrolla en gran detalle como un modelo matemático, antes de que haya ninguna evidencia a través de las observaciones de que aquella es correcta.*<sup>32</sup>

La idea de agujero negro en el universo se debe a John Michell, profesor de Cambridge que postuló en 1783 la idea de que una estrella de masa grande y compacta, originaría un campo gravitatorio tan enorme que no dejaría escapar la luz emitida por ella<sup>33</sup>. El matemático Pierre Simon Laplace (1749- 1827) llegó en los mismos años a conclusiones parecidas, pero no sería hasta la llegada de la *Teoría de la Relatividad General* de Einstein en 1915, que la idea resurgió con nuevas fuerzas. Los trabajos de Subrahmanyan Chandrasekhar y de Robert Oppenheimer fueron decisivos al respecto, al contar con toda la experiencia y conocimientos acumulados por la relatividad y la mecánica cuántica. En teoría, lo único detectable de un cuerpo de tal naturaleza es exclusivamente su fuerza gravitatoria, por lo que se descarta todo medio de observación directa al respecto. En este sentido, se podría decir que son objetos plenamente *antifotográficos*, a mitad de camino entre la abstracción y lo sensible. Las especulaciones cosmológicas sobre esta teoría se han unido a la del Big Bang, o de la expansión del universo, alimentando el poder de predicción de la ciencia teórica en unos casos, y la fantasía pseudo- científica en otros.

*De acuerdo con las teorías más aceptadas, dentro de 1010 años, nuestro sol se expandirá y llegará a convertirse en una estrella roja gigante (tragándose la Tierra a su paso) para luego contraerse hasta llegar a ser una enana blanca, estrella de dimensiones planetarias.*<sup>34</sup>

La detección de grandes flujos de radiación gravitacional procedentes de distintas zonas del centro de nuestra galaxia, y el hecho de que la luz pueda ser

absorbida en su totalidad por estos agujeros, han colocado a la ciencia astronómica en la tesitura de dilucidar hasta dónde son posible sus observaciones. El concepto de *singularidad* en el espacio y en el tiempo, traído a colación por astrónomos de renombre para intentar explicar la realidad de un mundo físico *distorsionado*, que no hace más que contradecir los modelos matemáticos<sup>35</sup>, ha venido a sumarse a la sensación generalizada de inestabilidad que encontramos en la ciencia del pasado siglo, que acepta con modestia la dificultad de articular concepciones generales y cerradas sobre el mundo que nos rodea. Una vez más, la imagen como tal, se sitúa en el eje del huracán de las disquisiciones científicas.

### 6.1.8. Quasi- estrellas y Big Bang

Este tipo de disquisiciones se vieron avivadas por el descubrimiento de los quásares, otra de las grandes hazañas conseguidas por la asociación de la radioastronomía con la observación óptica y la fotografía astronómica. Estas *quasi- estrellas* (del inglés: quasi-stellar radio source = quásar), fueron detectadas por medios interferométricos en 1960, obedeciendo a fuentes de diámetro muy pequeño<sup>36</sup>. A los pocos años, A. Sandage tomó fotografías de esa región con la ayuda del telescopio de cinco metros de diámetro del observatorio de Monte Palomar, descubriendo una estrella de unas características espectrales un tanto particulares. En un principio, se creyó que se trataba de una estrella de radio perteneciente a nuestra galaxia, pero en 1963 volvieron a detectarse nuevas estrellas de igual comportamiento. El desplazamiento hacia el rojo tan notable de estos cuerpos fue la causa de que no se supiera interpretar, en un primer momento, el cuadro espectroscópico detectado en ellas, caracterizado por una fuerte presencia del azul y del violeta. Nuevas fuentes encontradas con desplazamientos hacia el rojo aún más acentuados, hicieron pensar que más que estrellas, se trataba de galaxias pequeñas, pero de un brillo intenso, superior a las galaxias más próximas (Figura 6.31.). Fue esta apariencia de estrellas la que les otorgó el nombre de quásares. La revisión de antiguas fotografías certificó la existencia de estos quásares desde ochenta años atrás, caracterizándolos como fuentes muy variables en cuanto a su intensidad lumínica. Estudios de radio y fotográficos posteriores identificaron sus rasgos más sobresalientes en cuanto a su densidad electrónica, temperatura, brillo y proporciones, detectándose un núcleo de diámetro reducido, rodeado de una extensa nube de gas caliente, que las fotografías suelen mostrar como un gran chorro nebuloso despedido por el quásar (Figuras 6.32. y 6.33.). Observaciones posteriores, realizadas entre 1977 y 1980 por medio de técnicas interferométricas muy refinadas (VLBI), desvelaron movimientos de separación y expansión de estos cuerpos superiores a la velocidad de la luz, lo que ha despertado el interés de los astrónomos por la aparente trasgresión de los principios de la relatividad.<sup>37</sup>

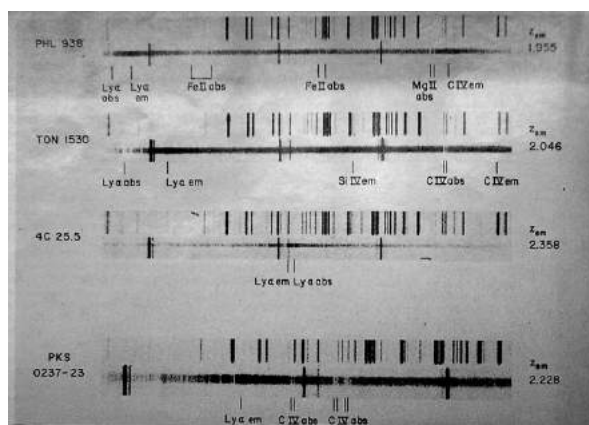


Fig. 6.31. Espectro de un quásar (*Quasi Stellar Objects*). Lick Observatory. 1969.

Las prospecciones radioastronómicas en el interior del universo no han cesado desde entonces, detectándose nuevos objetos estelares cada año, e identificándose de forma más precisa objetos registrados con anterioridad. Los objetos *BL Lac* son un ejemplo de ello; se trata de estrellas similares a los



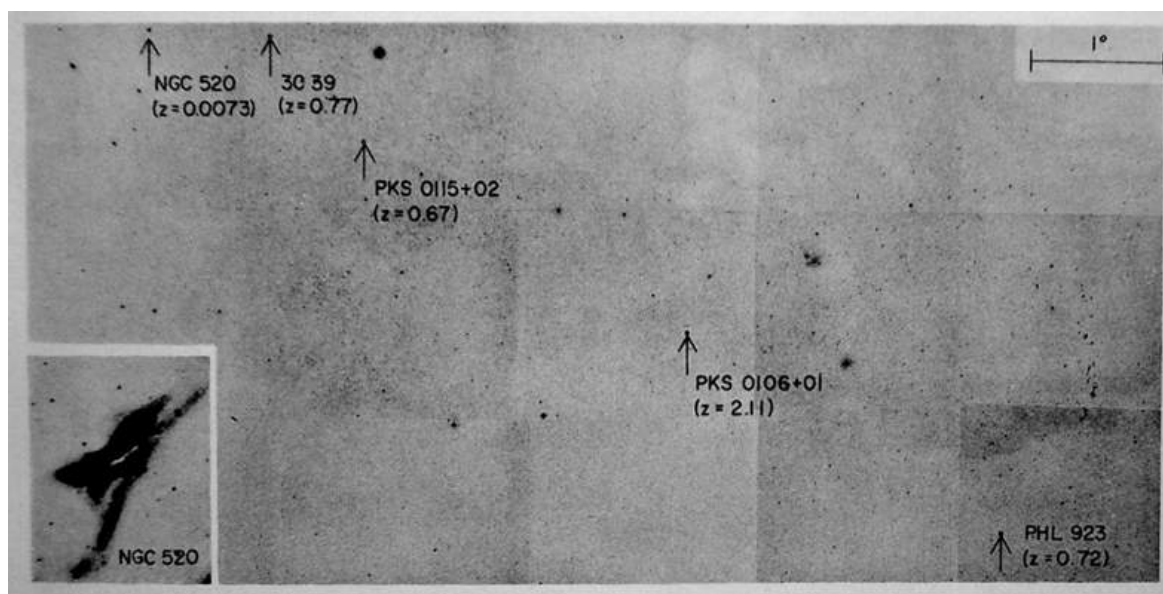


Fig. 6.32. Fotografía de la galaxia NGC 520 y de los quásares alineados, realizada por el observatorio Palomar. 1969.

quásares, que han sido fotografiados desde principios del anterior siglo en la constelación del Lagarto, despertando el interés de los astrónomos por su extraño comportamiento. Nuevas técnicas de producción de imágenes por escáner han permitido desvelar rasgos espectroscópicos que parecían inexistentes hasta entonces. La proliferación de nuevos quásares, detectados a enormes distancias, ha obligado a reservar el acrónimo QSO (Quasi Stellar Objects) para todos los objetos celestes detectados en el espacio extragaláctico, de apariencia estelar y de gran luminosidad. El hecho de que las galaxias radio muestren por lo general una estructura bipolar, formada por dos núcleos que se separan con el tiempo, o que los acentuados desplazamientos hacia el rojo de los espectros de los quásares puedan ser interpretados en base a las fuerzas gravitacionales de estos cuerpos, ha suscitado numerosas especulaciones de carácter cosmológico entre los astrónomos. La concentración extrema de energía que se supone asociada a los núcleos tan pequeños de estos cuerpos ha dado un fuerte impulso a las tesis

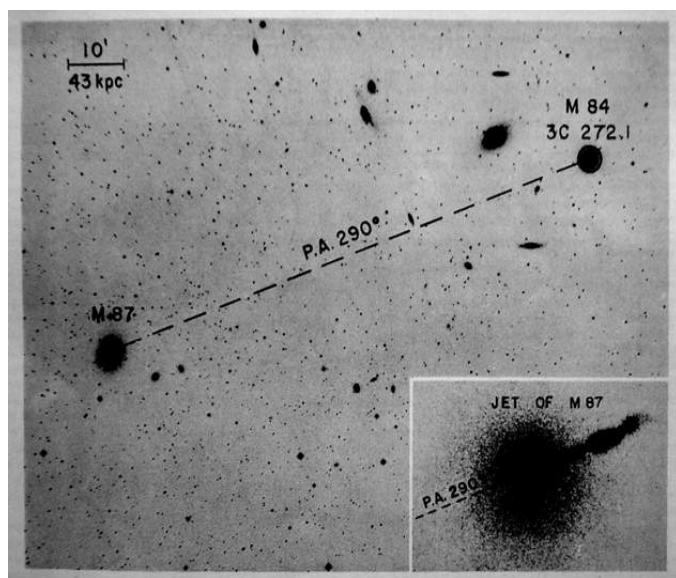


Fig. 6.33. Radio- galaxias M 87 y M 84, y estrellas alineadas. Imagen realizada por el observatorio Palomar. 1969.

defensoras de la existencia de *agujeros negros*. A su vez, este tipo de disquisiciones cosmológicas ha encontrado un gran caldo de cultivo en otro de los grandes hitos de la ciencia radioastronómica, esta vez marcado por el descubrimiento en 1965 de la radiación de fondo del universo, por Arno A. Penzias y Robert W. Wilson. Esta radiación, perteneciente al espectro de las microondas, se detecta uniformemente en todas las direcciones del universo, y ha terminado por recuperar la tesis de George Gamow de 1946 sobre el origen del universo, como resultado de una gran explosión, conocida hoy día como Big Bang.<sup>38</sup>

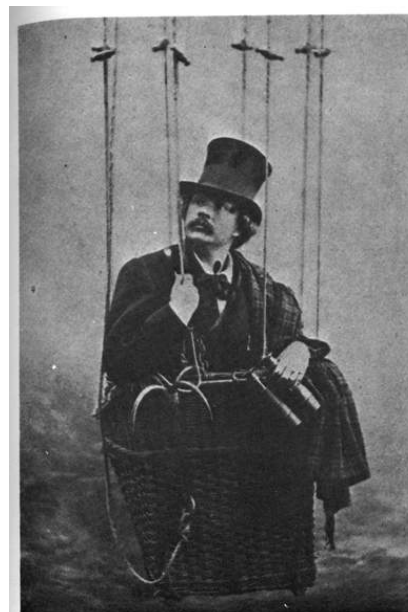


La observación y medición de nuevos fenómenos radioastronómicos ha abierto las puertas a continuas disquisiciones. La existencia de lentes gravitacionales, formadas por la presencia de grandes cuerpos estelares, interpuestos entre los cuerpos observados y nuestros instrumentos de observación, ha dado lugar a numerosas malinterpretaciones por el efecto de duplicidad que provocan. Las observaciones siguen un proceso interminable de aproximación a la verdadera naturaleza de los fenómenos, donde lo real vuelve a ser parte de una nueva ilusión, y lo ilusorio pasa a ser realidad, tal como sucede con nuestro conocimiento progresivo de la naturaleza. En resumidas cuentas, las observaciones radioastronómicas nos desvelan rasgos de los fenómenos estelares ocultos a la instrumentación óptica, al ser capaces de atravesar capas de polvo y bruma que ciegan nuestra visión, o de detectar niveles mínimos de energía en forma de ondas procedentes de abismos insondables. La observación directa de los fenómenos por medios ópticos, completa este tipo de hallazgos, y representa la confirmación que la ciencia siempre busca de los fenómenos ocurridos en el espectro no visible. En nuestro estudio del universo distante interfieren numerosos elementos que se encuentran emplazados entre los objetos de estudio y nuestros instrumentos de observación; la mejor forma de paliar estas intromisiones perturbadoras ha sido tradicionalmente por medio de aumentar la capacidad de las observaciones realizadas desde nuestro planeta, un camino alternativo ha sido acercar la instrumentación a las proximidades de los cuerpos celestes con la utilización de múltiples medios de transporte, que van desde globos a sondas intergalácticas.

### ***6.1.9. La fotografía en la conquista del espacio***

#### ***6.1.9.1. Globos en el cielo***

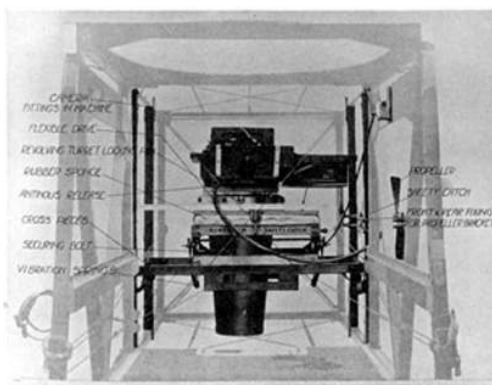
Entre las primeras experiencias que existen de trasladar la instrumentación fotográfica al espacio, se encuentra la de Nadar (Gaspard Félix Tournachon), una de las figuras más emblemáticas de la historia de la fotografía, debido principalmente a la excelencia de sus retratos. Nadar emprendió sus primeras ascensiones en globo sobre los tejados de París a partir de 1853, convencido de que podría ser una herramienta muy útil para fines topográficos y militares (Figura 6.34.). Curiosamente, también a él se debe la exploración fotográfica de las redes subterráneas de alcantarillado de esta misma ciudad. Las primeras subidas no tuvieron demasiado éxito por el daño que sufrieron las placas de colodión utilizadas, a causa de los gases despididos por los globos en su ascenso.<sup>39</sup> Pero la técnica fue depurada, y pudo fotografiar la ciudad a bordo de distintos globos, entre los que hay que destacar el bautizado *Niépce*, en homenaje al padre de la fotografía. El gran pintor Daumier caricaturizó estos proyectos<sup>40</sup>, que, tal como había preconizado Nadar, comenzaron a ser aplicados a partir de 1859 en varias guerras de uno y otro lado del Atlántico, preferentemente para fines de reconocimiento. En 1880 ya se producían fotografías aéreas de gran calidad desde alturas de hasta 1.100 metros, gracias, entre otras razones, a la aparición de las emulsiones de gelatina en seco



***Fig. 6.34. Nadar subido a uno de sus globos. 1856.***



*Fig. 6.35. Equipo de fotografía aérea. c.a. 1920.*



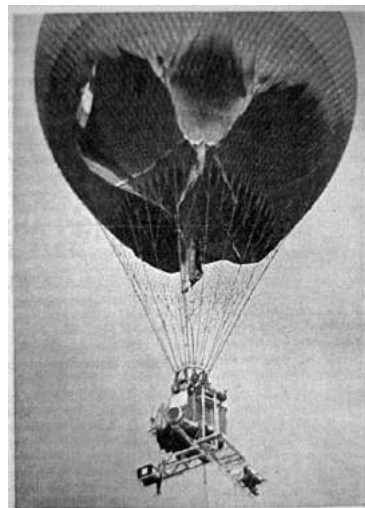
*Fig. 6.36. Equipo de fotografía aérea. c.a. 1920.*

de bromuro de plata. Tanto la fotogrametría, o aplicación de la fotografía al estudio y medición de superficies a partir de los ángulos y de las coordenadas registradas en las películas, como la fotografía aérea, dieron sus primeros pasos de la mano de estos globos, y, en ocasiones, incluso de cámaras suspendidas de cometas<sup>41</sup>. Ambas técnicas potenciaron a su vez, el uso de procedimientos estereoscópicos para el estudio en tres dimensiones de las superficies, una modalidad con una gran aceptación en medios militares y urbanísticos por proporcionar información relativa a la altura y el volumen de los accidentes geográficos. Con el tiempo, las técnicas estereofotográficas fueron aplicadas abundantemente en astronomía, especialmente en los estudios de superficies de planetas llevados a cabo por las expediciones enviadas al espacio.

La primera guerra mundial potenció la utilización de la fotografía aérea para tareas de reconocimiento militar, contando entonces con el apoyo de los primeros aviones (Figura 6.35.). Tras la contienda, este tipo de fotografía se convirtió en una herramienta de gran ayuda en la planificación urbanística, el diseño de líneas de transporte urbano, en el estudio de terrenos, en la localización de

recursos naturales y en estudios de costas<sup>42</sup>. Las condiciones adversas en las que normalmente se llevaba a cabo este tipo de fotografía, y el hecho de que fuera personal inexperto el encargado de las operaciones, como era el caso de los pilotos de guerra, potenció la fabricación de cámaras automáticas y el envío de globos no tripulados. En este contexto, los disparadores accionados mediante dispositivos eléctricos representan las primeras incursiones de este tipo de energía en estas técnicas (Figura 6.36.).

En astronomía, el uso de globos, como medio de acercar la instrumentación de medida y de observación a los objetos, ha sido una constante hasta nuestros días. En el caso concreto de la fotografía, fue de imperiosa necesidad vencer las perturbaciones producidas por las capas y fenómenos atmosféricos más próximos a la Tierra; y obtener un mayor acercamiento de la instrumentación a cuerpos difíciles de observar de forma directa, como es el sol. Para el estudio de fenómenos que requieren resoluciones mayores de las que permiten las observaciones desde tierra, como las erupciones solares, ha sido de gran utilidad el empleo de globos tripulados, con ascensiones de hasta 10.000 pies, permitiendo fotografiar durante tiempos prolongados este tipo de



*Fig. 6.37. Aparatos fotográficos en globo para el estudio de la superficie solar. 1957.*

fenómenos<sup>43</sup> (Figuras 6.37. y 6.38.). Recordemos en este contexto, el papel tan importante desempeñado por el lanzamiento de globos destinados a realizar los primeros registros fotográficos de rayos cósmicos (ver cap 3.7.); o los ascensos en globo de August Piccard, junto a su mujer fotógrafo, a partir de 1922, a alturas de hasta 16.000 metros, para estudios de la actividad magnética y de las emisiones de radio en estas capas altas de la atmósfera<sup>44</sup>. En este intento continuado por vencer las capas atmosféricas, y por acercar la instrumentación a los objetos celestes, la tecnología radar aplicada a globo- sondas ha sido también de gran ayuda; concretamente, para dar a conocer el estado de los vientos y los perfiles de temperatura o de densidad atmosféricas, previo al envío de aviones, proyectiles o cohetes al espacio.

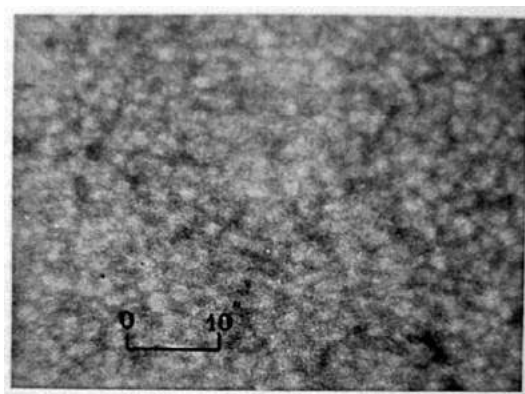


Fig. 6.38. Fotografía de la superficie solar tomada desde un globo.1957.

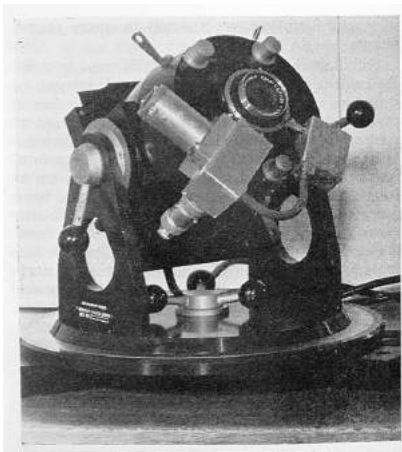
### 6.1.9.2. Cohetes en el espacio

Las primeras ideas sobre la posible incorporación de una cámara fotográfica a un cohete se deben al francés Amédée Denisse, en 1888; aunque la primera patente registrada no fue presentada hasta 1903, por Alfred Maul<sup>45</sup>. La fabricación de cohetes, desde los primeros artifices chinos en el siglo XIII hasta nuestros días, ha estado ligada tradicionalmente a fines bélicos. No fue hasta principios del siglo XX que esta disciplina comenzó a integrarse en el ámbito puramente científico, concretamente, en los estudios de exploración del espacio. Tanto K. Ziolkovsky como R. Goddard, precursores teóricos de los cohetes a propulsión, tenían como primer objetivo promover los vuelos espaciales, o trasladar la instrumentación meteorológica a grandes altitudes<sup>46</sup>. Goddard obtuvo resultados prácticos a partir de 1926, e incluso defendió ya en esas fechas la posibilidad de enviar cohetes a la luna. La Segunda Guerra Mundial impulsó el desarrollo de la tecnología de cohetes, destacando los V-2 alemanes, que fueron lanzados en gran número contra Inglaterra. Tras la contienda, estos mismos cohetes fueron perfeccionados en Estados Unidos, para ser utilizados en investigaciones científico- militares, abriéndose una nueva era, conocida como *ciencia espacial*, o *del espacio*.

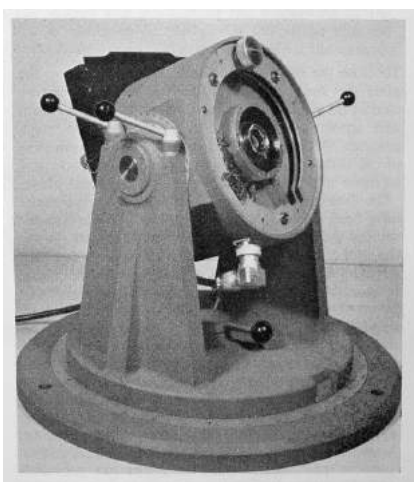
*De hecho, la guerra, sea fría o caliente, o se trate de un conflicto real o potencial, es la principal beneficiada de la ciencia espacial. De las inversiones en cohetes, las destinadas al verdadero servicio de la ciencia suponen todavía un pequeño porcentaje del presupuesto total.*<sup>47</sup>

La fotografía estuvo presente en el lanzamiento de cohetes desde un principio. Para ello, se sirvió de la experiencia adquirida con las técnicas de alta velocidad aplicadas al campo de la balística, y en su tradicional apoyo a las técnicas espectrográficas. En 1946, se lanzó el primer V2 con capacidad para fotografiar el espectro solar en la franja del UV. Este hecho coincidió con el envío, por el propio Goddard, de un cohete a una altura de 46 millas, equipado con instrumentación meteorológica. Los lanzamientos rusos, por su parte, se especializaron en el estudio espectrográfico del sol en la región UV del espectro, y de la capa de ozono, cuyo espectro fue registrado fotográficamente en sucesivas tomas al ritmo ascendente del cohete<sup>48</sup>. En pocos años, la fotografía aplicada a cohetes facilitó el





**Fig. 6.39.** Cámara utilizada en el cohete Skylark. 1960.



**Fig. 6.40.** Cámara de gran angular utilizada en un cohete Skylark. 1960.

registro del sol en la franja de rayos X con emulsiones protegidas con láminas de metal, y del UV extremo; y de fenómenos más ligados a nuestro planeta, como la distribución de nubes o la formación de huracanes. La instrumentación fotográfica incorporada a estos vuelos, obtuvo una gran reputación dentro de la comunidad científica por ofrecer imágenes de gran calidad, tanto a través de la captación directa de los fenómenos, como a través de los resultados ofrecidos por otros instrumentos como oscilógrafos, detectores de rayos X, cine- teodolitos, o espectrógrafos.

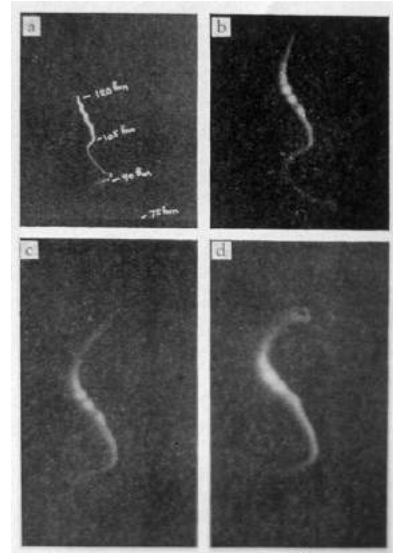
La fotografía desarrolló múltiples formas de actuación en el campo de lanzamiento de cohetes en combinación con otras técnicas de medición. Así por ejemplo, sirvió para registrar señales acústicas y de destellos de flashes utilizadas para la determinación de altitudes y temperaturas en las diferentes capas atravesadas por estos bólidos, operaciones que se solían coordinar con el uso de dispositivos fotoeléctricos emplazados en las estaciones terrestres y en los propios cohetes. La combinación de técnicas fotográficas y fotoeléctricas se produjo prácticamente desde los inicios de estos lanzamientos. En 1949, los cohetes Aerobee incorporaron contadores de fotones fotoeléctricos a modo de fotómetro para la medición exacta de las líneas espectrales solares, registradas por los espectrógrafos en las franjas del UV y de rayos X. Posteriormente, esta misma técnica fue utilizada con nuevos cohetes de esta serie para el estudio de determinadas estrellas. En el estudio de fenómenos imprevisibles, como las erupciones solares, se emprendieron en 1956 lanzamientos consecutivos de cohetes de la serie *Rockoon*, a un ritmo de un cohete diario durante

diez días. Una vez que las erupciones eran detectadas desde tierra mediante telescopios, se activaba por radio la instrumentación a bordo del cohete. Estos ensayos fueron perfeccionados posteriormente con la serie de cohetes *Solrad* y con los primeros satélites situados en la órbita solar, denominados OSO (Orbiting Solar Observatory). A partir de 1956, los cohetes *Rockoon* comenzaron a observar desde el espacio emanaciones de rayos X galácticas e intergalácticas, hecho completado en 1962 por el proyecto Aerobee<sup>49</sup>.

En los lanzamientos de cohetes de la serie *Skylark*, iniciada en 1957, fueron utilizadas diferentes cámaras acopladas a las cabezas de los cohetes. La mayoría fueron de foco fijo, de diferentes longitudes focales para permitir campos de visión entre 40 y 65°, y de gran formato, con placas de 12x12 y 18x18 cms. (Figuras 6.39. y 6.40.). En ocasiones, se instalaron cámaras de pequeño formato para el estudio de las radiaciones solares en el espectro del UV y de los rayos X, que eran rescatadas del espacio mediante paracaídas. Para la captación y registro de rayos X procedentes del sol, la automatización de las operaciones se llevó a cabo mediante cámaras sin lentes, provistas de varios iris, asignados cada uno de ellos a una determinada longitud de onda. Un disparador automático, programado a intervalos definidos, se encargaba de registrar las radiaciones a su debido tiempo<sup>50</sup>. Este tipo de cohetes fueron de gran importancia en el estudio de las capas altas de

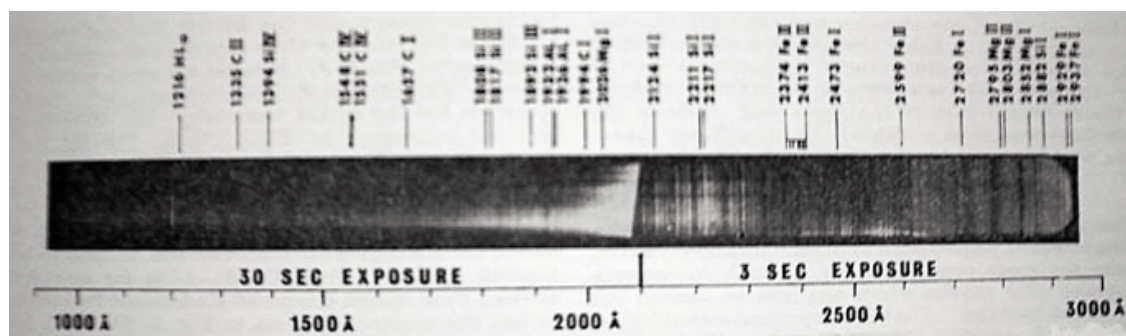


la atmósfera, especialmente para la determinación de vientos, temperaturas, densidad electrónica, radiación solar y de rayos cósmicos, medición de campos geomagnéticos y en investigaciones de la ionosfera mediante el análisis de las emisiones radio.<sup>51</sup> En el caso concreto del estudio de los vientos en las capas altas de la atmósfera, fueron lanzados varios cohetes de la serie Skylark en 1958. El procedimiento consistió en la producción de una estela de vapor de sodio por los cohetes, reconocible en determinado momento del día. Se solía aprovechar una hora concreta del atardecer para disponer de un fondo de cielo oscuro que contrastara con la estela, iluminada en este caso por la luz amarilla típica de la línea D del espectro solar.<sup>52</sup> El trazo era entonces registrado por diferentes cámaras (foto fija y en serie) colocadas estratégicamente, de manera que se pudiera cubrir de forma completa los movimientos de la estela durante los veinte minutos que ésta se mantenía visible (Figura 6.41.). Mediciones simultáneas mediante células fotoeléctricas colocadas en los cohetes, permitieron conocer los valores fotométricos del sol en distintas posiciones. El conjunto de datos producidos fue procesado, en esta ocasión, por el ordenador *Pegasus*.

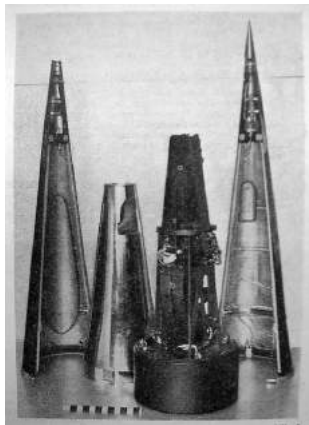


*Fig. 6.41. Fotografías de la propagación de vientos de la atmósfera superior, realizadas por un Skylark. 1960.*

En 1964, se lanzaron dos nuevos cohetes de la serie Skylark, modernizados con técnicas de estabilización que permitieron mejores registros fotográficos. El objetivo fue el estudio de la corona solar y de la cromosfera mediante espectrógrafos y cámaras sin lentes diseñadas para registrar las radiaciones en el espectro UV y de rayos X (Figura 6.42.). Ese mismo año, el *Aerobee-hi* y el *OSO1*, primer observatorio colocado en la órbita solar, proporcionaron información sobre el espectro del UV extremo.<sup>53</sup> El conjunto de estos cohetes iba provisto de un sistema de estabilización mediante servomecanismos y dispositivos fotoeléctricos que permitieron en todo momento la corrección del posicionamiento de la instrumentación a bordo. El material expuesto por los espectrógrafos y las cámaras fotográficas, se conservaba en un armazón, tipo cassette, emplazado en la cabeza del cohete, hasta su rescate mediante paracaídas. Mecanismos de relojería hacían posible la exposición del material a lo largo del trayecto del cohete, reservando un mayor número de tomas para el momento álgido de la nave, previo a comenzar su descenso (Figura 6.43.). Las exposiciones eran de tres minutos, y se llevaban a cabo a una altitud de 110 a 167 kms. En cierta ocasión, las fotografías tomadas fueron rescatadas intactas, a pesar del accidente sufrido por uno de los cassettes



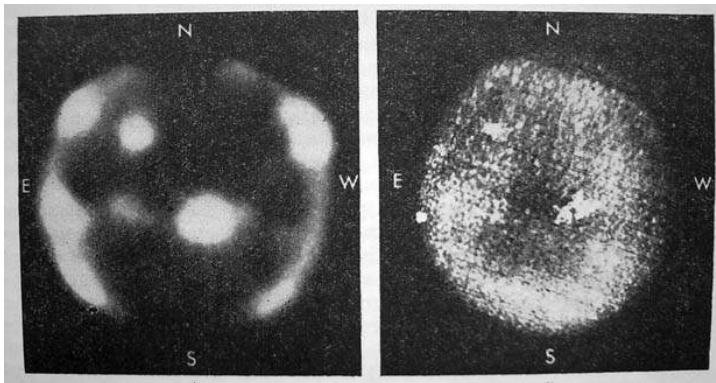
*Fig. 6.42. Espectro compuesto grabado por un espectrógrafo de incidencia normal instalado en la cabeza de un cohete Skylark .1965.*



**Fig. 6.43.**  
*Cabeza de un cohete Skylark con el equipo: espectrógrafos y una cámara sin lente (pinhole). 1965.*

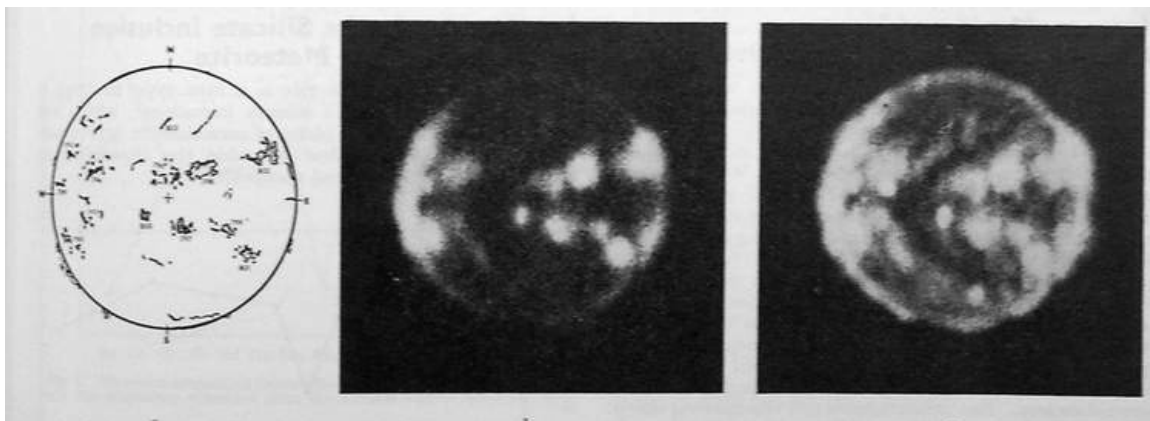
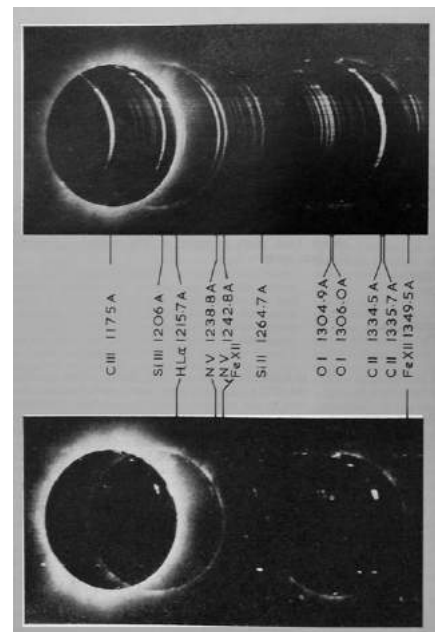
al no abrirse el paracaídas, (Figura 6.44.). Lanzamientos posteriores de cohetes de la serie Skylark se ciñeron al estudio del sol en el espectro UV y de rayos X, mientras los Aerobee comenzaron a realizar estudios de estrellas de la constelación de Orión en esas mismas franjas del espectro, y análisis espectrográficos de la corona solar durante el eclipse de sol de 1970, con tecnología mixta formada por película fotográfica y células fotoeléctricas.<sup>54</sup> (Figura 6.45.). En 1968, un nuevo Skylark incorporó, por primera vez en este tipo de vehículos, un interferómetro para el estudio de determinadas líneas espectrales del disco solar, en conjunción con

cámaras sin lentes y espectrógrafos, para juntos proporcionar nuevas imágenes del sol en el UV extremo<sup>55</sup> (Figura 6.46.).



**Fig. 6.45.** a) Fotografía de rayos X del sol; y b) Espectroheliograma, tomados por una cámara sin lente instalada en la cabeza de un cohete Skylark. 1965.

**Fig. 6.44.** Espectro solar en el UV extremo, registrado por un cohete Aerobee 150, durante el eclipse total de sol, del 7 de marzo, 1970.



**Fig. 6.46.** Diagrama y fotografías de UV extremo del Sol, tomadas por un cohete Skylark. 1969.

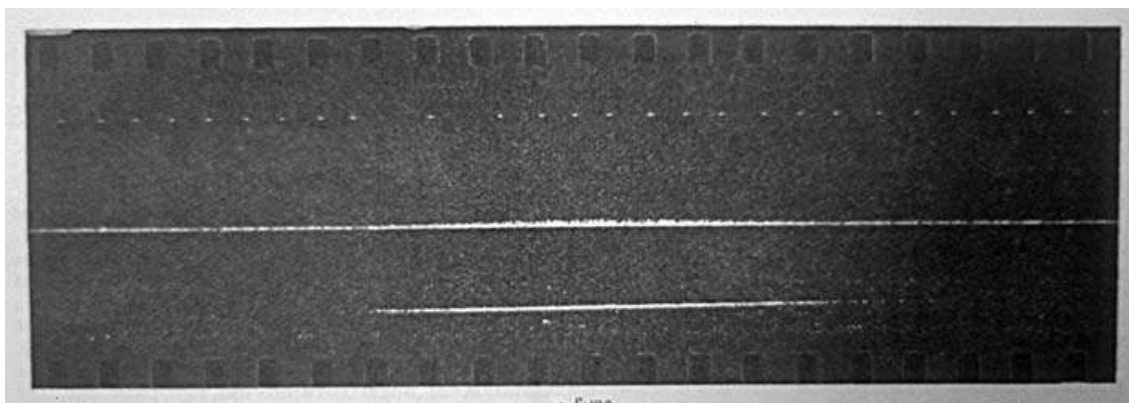
### 6.1.9.3. Satélites en órbita

A partir de 1957, fecha de lanzamiento del *Sputnik*, se abrió una nueva época en la exploración del espacio a cargo de los satélites artificiales. Globos, cohetes y satélites fueron durante estos años las tres tecnologías básicas del estudio astronómico desde el espacio. Posteriormente, se irían sumando los observatorios espaciales, los vuelos tripulados y las sondas intergalácticas. Hay que resaltar que la tecnología de lanzamiento de cohetes ha perdurado a lo largo de los años, haciendo posible el envío de todo tipo de naves, incluidos los satélites. Además de servir como elemento propulsor, los cohetes han sido utilizados, junto a los telescopios ópticos y de radio, como instrumentos para la monitorización, seguimiento y registro fotográfico de toda suerte de vehículos. El envío de satélites a las órbitas terrestres tuvo un fuerte impacto, no sólo en el terreno científico, sino en el político, militar y de las comunicaciones. En cuestión de unos meses, el lanzamiento de satélites proliferó de forma espectacular. Al *Sputnik 1*, le siguieron el *Sputnik 2*, la serie *Explorer*, *Vanguard*, el *Atlas*, los *Discoverer 1* y *2*, las series *Tiros* y *Nimbus*, y un largo etcétera que continúa hasta nuestros días sin visas de remisión. Los cometidos más importantes de los primeros satélites fueron estudios astronómicos, meteorológicos, de reconocimiento, y proyectos de telecomunicaciones. El lanzamiento de satélites marcó un punto de inflexión en la utilización de las técnicas de producción de imágenes, favoreciendo el uso de la tecnología electrónica, en detrimento de las técnicas fotográficas convencionales. La necesaria transmisión a distancia de las imágenes, junto al procesamiento de la información, potenciaron este cambio en favor de técnicas de vídeo y televisión, detectores fotoeléctricos, tubos convertidores e intensificadores de imagen, y de ordenadores digitales. La serie *Tiros*, destinada mayormente a estudios meteorológicos, incorporó cámaras de televisión con tecnología de tubos Vidicom de media pulgada que permitieron la captación de imágenes con resoluciones por debajo de los 500 metros. Estos satélites permitieron la confección de mapas terrestres relativos a la distribución de nubes, datos de los flujos de calor emitidos por la corteza terrestre y cuadros sinópticos atmosféricos destinados a la predicción del tiempo. La predicción en 1961 del huracán *Esther* mediante este tipo de satélite, adelantándose dos días a los métodos convencionales, supuso un éxito notable para esta nueva tecnología.

Los satélites rusos, por su parte, lograron a partir de 1962 fotografiar, en sucesivas ocasiones, el lado oculto de la luna, mediante sistemas de obturación automáticos y equipos emplazados en una serie de estaciones satelitales interplanetarias pertenecientes al proyecto *Lunik*. Se hicieron fotografías en 35 mm con cámaras acopladas a telescopios ubicados en los propios satélites. El material expuesto se revelaba *in situ*, y las imágenes se transmitían vía radio a la tierra, con tecnología fax. En estos primeros ensayos con satélites, las técnicas de transmisión de imágenes no estaban todo lo depuradas que cabría esperar debido principalmente a problemas de alimentación energética, por lo que en ocasiones se prefirió el almacenamiento de las imágenes en cintas magnéticas hasta la recuperación posterior del satélite. La fotografía de sales de plata, y más en particular las emulsiones nucleares, prestaron un gran servicio en proyectos no necesariamente ligados a la producción de imágenes convencionales. Ejemplo de ello, fue el registro de los trazos producidos por radiaciones de alta energía (rayos cósmicos), y la detección de rayos X procedentes del sol, tal como se venía haciendo con los cohetes. Para estas últimas operaciones, se utilizaron filtros fabricados con láminas de aluminio y de berilio antepuestos a la película fotográfica.<sup>56</sup>

Para principios de la década de los sesenta, los ordenadores se convirtieron en una pieza indispensable en la instrumentación de los proyectos espaciales,



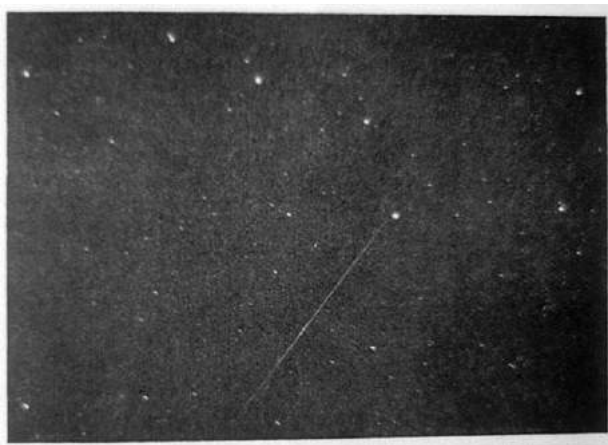


*Fig. 6.47. Señales de radar del paso del Sputnik, 12 de octubre de 1957. Película colocada en una cámara Schmidt. 1957.*

especialmente, para el cómputo y procesamiento de una información cada vez más abundante. Son años en los que el procesamiento digital de las señales, incluidas las relativas a imágenes, marcó el principio de una nueva era. El sistema *Timtape*, diseñado en 1960 para procesar datos telemétricos relativos al lanzamiento de misiles, fue uno de los primeros en utilizar cintas magnéticas para el registro de la información, cuyos datos eran convenientemente digitalizados con la ayuda de tecnología de tarjetas perforadas. Esto lo convirtió en uno de los sistemas precursores de esta nueva andadura tecnológica.<sup>57</sup>

La combinación de técnicas fotográficas convencionales con técnicas fotoeléctricas y de radar fue utilizada también en el control y seguimiento desde tierra de las órbitas de los satélites artificiales. Cámaras empleadas tradicionalmente en el campo de la balística, fueron utilizadas para registrar el paso de los satélites. Para ello, se utilizó un sistema de obturación formado por múltiples ranuras finas, dispuestas en el plano focal. El sistema estaba sincronizado por medio de tecnología de pulsos y fotomultiplicadores. Mientras que la dirección del satélite era registrada convenientemente por la película, la intensidad de la señal era recogida por el fotocátodo con gran precisión temporal; esto proporcionaba información exacta sobre la hora, elevación y azimuth del trazado fotográfico.<sup>58</sup> El lanzamiento del Sputnik sirvió a numerosos científicos repartidos por la geografía mundial para emprender estudios de detección con tecnología de radio mayormente. La ocasión fue propicia para poner a prueba técnicas interferométricas, de radar, de registro Doppler, o estudios de propagación de ondas, útiles para determinar el comportamiento orbital del satélite, del mismo

cohete propulsor así como de los fenómenos atmosféricos producidos a un mismo tiempo.<sup>59</sup> (Figuras 6.47. y 6.48. y ver Fig. 2.72.)



*Fig. 6.48. Fotografía Tri X del paso del satélite ruso Beta el 7/11/57.*

La tecnología de satélites permitió ahondar en el estudio de las radiaciones procedentes del sol, estrellas y galaxias en el espectro UV y de los rayos X, más allá de donde los cohetes y los globos habían llegado. Así fue posible la detección de rayos gamma y de pulsos de radio y de rayos X pertenecientes a diferentes galaxias. La captación por el satélite OSO III de un fondo difuso de rayos X de procedencia

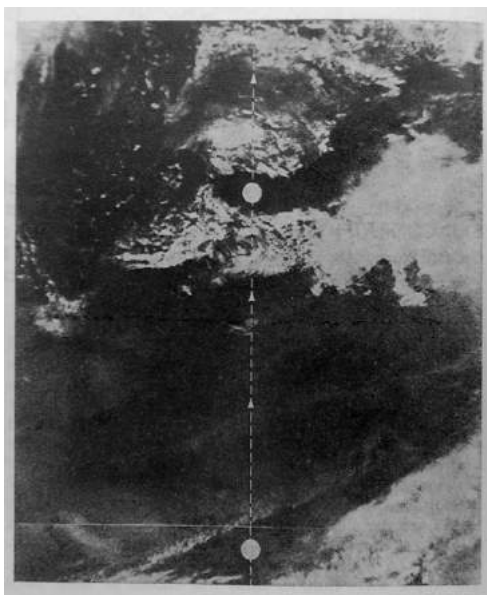


desconocida, suscitó numerosas especulaciones sobre su origen, y motivó la investigación astronómica a niveles intergalácticos. El estudio de las galaxias y de las agrupaciones de galaxias por el satélite Uhuru, por ejemplo, aportó pistas muy reveladoras sobre la composición de los gases presentes en ellas, o sobre sus emisiones de rayos X, datos que suscitaron vivas discusiones acerca de un universo cerrado o abierto, o sobre los límites que presentan estas agrupaciones galácticas<sup>60</sup>. La astronomía de rayos X pasó a convertirse en una disciplina de gran solidez dentro de la exploración del espacio, a raíz del lanzamiento de satélites como el SAS-A (1970) o el UK-5 (1973), especializados en el estudio de este tipo de radiación procedente de diferentes objetos y fuentes astronómicas.<sup>61</sup>



*Fig. 6.49. Interpretación de la geología a través de fotografía de satélite (Nimbus 1) (14/12/64).*

A principio de los sesenta, las grandes potencias, Estados Unidos y la URSS, potenciaron aún más el lanzamiento de satélites especializados en múltiples funciones. Algunos de ellos, como el *Samos* y el *Midas*, fueron destinados a labores de reconocimiento como apoyo a la red de detección de misiles. Otros, como los *Nimbus*, o el *Tiros I*, se utilizaron con fines meteorológicos y en estudios geológicos, incorporando cámaras de televisión de tecnología Vidicom de alta resolución ( 800 líneas) (Figura 6.49. y 6.50.). Estos programas espaciales fueron apoyados desde tierra con el desarrollo de tecnología electrónica de escaneado y de transmisión de imágenes automatizada como la *LARS* (Multispectral Sensors on the Agricultural Remote Sensing) la *ERTS* ( Earth Resources Technology Satellite), o la *EOS* (Earth Observatory Satellite). En ocasiones, se realizaron estudios geológicos comparativos entre fotografías de la superficie lunar y de determinadas zonas de la tierra para buscar pistas acerca de la estructura y etiología de las formaciones volcánicas de nuestro satélite. (Figura 6.51.).



*Fig. 5.50. Imagen de TV tomada por el satélite Nimbus 4. 1970.*



*Fig. 6.51. Fotografía aérea de un valle de Kenia con estructura volcánica, para estudios comparativos de la estructura tectónica con paisajes lunares, fotografiados por el Apolo 4. 1969.*

En 1962, un programa de cooperación de la NASA y la AT&T hizo posible el lanzamiento del Telstar I, un satélite diseñado especialmente para las telecomunicaciones, pero que se supo aprovechar para fines científicos.

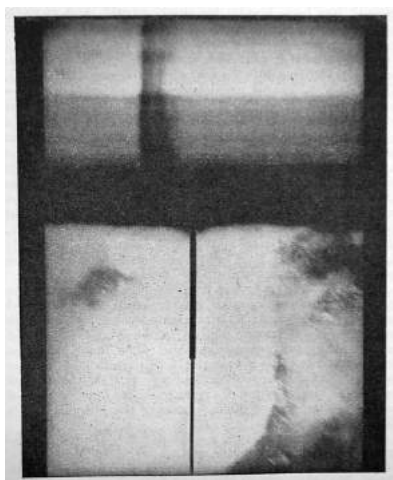
*El Telstar, aparte de servir para las telecomunicaciones tanto de telefonía como de TV, sirvió de laboratorio espacial para probar la capacidad de los transistores y los diodos semiconductores, diseñados para captar radiaciones ionizantes, rayos gamma, etc.*<sup>62</sup>

La administración norteamericana, bajo la presidencia de John F. Kennedy, impulsó el desarrollo de la tecnología de satélites al servicio de las telecomunicaciones con el lanzamiento de la serie *Syncom* y los *Intelsat*. Uno de los aspectos más sobresalientes de esta política fue la búsqueda de una dimensión internacional para las telecomunicaciones, especialmente la televisión. El presidente Kennedy se esforzó durante su mandato en promocionar su proyecto *Mundovisión*, consistente en dar a la televisión una escala realmente universal. Paradojas del destino, el evento que sirvió para catapultar definitivamente este nuevo medio de comunicación de masas a ese nivel exigido, fue el magnicidio en 1963 de su principal artífice: el propio presidente. Los cuatro días posteriores a su asesinato constituyeron el evento mediático más sobresaliente habido hasta aquella fecha, sólo comparable, en esta misma década, al lanzamiento del Apolo XI en 1969 y la llegada del hombre a la luna. Las telecomunicaciones vía satélite permitieron el trasiego de información a lo largo de la geografía mundial, incluso a zonas hasta entonces apartadas de los grandes canales de comunicación por cable terrestre o submarino. Las cotizaciones de bolsa, la información periodística, la meteorológica, o las retransmisiones televisivas comenzaron a utilizar estas nuevas plataformas emplazadas en el espacio. Todo ello sirvió para desarrollar la tecnología electrónica de transmisión de datos e imágenes, y facilitar las comunicaciones de carácter científico entre las estaciones, los observatorios terrestres y las diferentes naves enviadas al espacio.

#### **6.1.9.4. Vuelos tripulados**

El desarrollo de la tecnología espacial en estos años, se produjo en un clima de alta tensión política entre las dos grandes potencias: la URSS y los Estados Unidos. Los intereses científicos se vieron sometidos normalmente a prioridades de carácter estratégico- militar. El esfuerzo por desarrollar una tecnología de observación y de telemedición astronómicas, se vio ligado las más de las veces a proyectos impulsados por un sector armamentístico que crecía sin freno desde el final de la guerra. El interés por enviar nuevos satélites y naves tripuladas al espacio obedeció a un deseo por potenciar una tecnología muy precisa, orientada no sólo hacia los confines del espacio, sino también hacia nuestro propio planeta, con el fin primero de conocer las intenciones y la estructura bélicas del enemigo. A principios de la década de los sesenta, la pugna entre estos dos países comenzó a desplegarse en este nuevo escenario. Los soviéticos tomaron la delantera, poniendo en órbita el Sputnik y lanzando a los pocos meses la nave espacial Lunik II con la perrita Laika en su interior. Los americanos respondieron con el lanzamiento del satélite Explorer y con la nave Mercury con un primate a bordo. Ese mismo año de 1961, los soviéticos volvieron a adelantarse con el envío al espacio del primer astronauta: V. Gagarin. Como era de esperar, los norteamericanos enviaron al año siguiente a John Glenn, su primer astronauta; esta vez, equipado con una cámara Minolta Ansco Autoset de 35 mm, comprada en un supermercado, y modificada ligeramente para la expedición.<sup>63</sup> El emplazamiento de satélites de reconocimiento en las órbitas terrestres por ambas

potencias comenzó a aportar fotografías muy reveladoras de las cabezas nucleares apostadas en zonas estratégicas del planeta, hecho que desencadenó la conocida *crisis de los misiles* del año 62. La ciencia, mientras tanto, aprovechó como pudo todo este esfuerzo tecnológico para sus propios fines.



*Fig. 6.52..  
Cámara de  
doble función,  
instalada en la  
nave espacial  
Gemini- Titan  
5. Realiza  
espectrogramas  
y fotografías; en  
este caso, de las  
nubes para  
medir su altitud.  
1965.*

Los primeros proyectos de vuelos tripulados tuvieron como objetivo enviar hombres al espacio próximo a nuestro planeta. El proyecto *Mercury*, iniciado en octubre de 1958, propuso el emplazamiento del primer hombre en la órbita terrestre. Este proyecto que duró hasta 1963 proporcionó numerosas fotografías de la corteza de nuestro planeta, tomadas normalmente con cámaras Zeiss Contarex de 35 mm y Hasselblad Medium 550C<sup>64</sup>. El proyecto ruso *Voskhod*, hizo lo mismo a partir de 1962, consiguiendo poner varias naves tripuladas en distintas órbitas terrestres, y situando un astronauta en

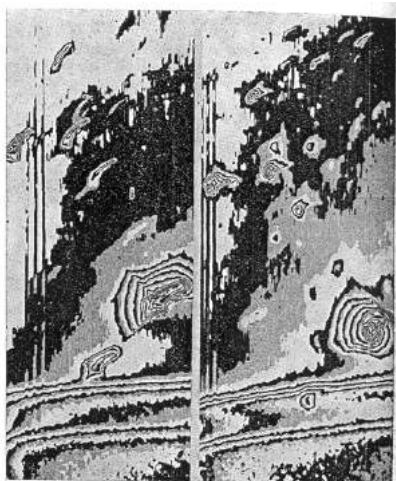
el espacio libre a tan sólo unos metros de la nave. Durante los años 65 y 66, Estados Unidos inició el programa *Gemini*, con el envío de astronautas al espacio. Dentro de este proyecto, cabe destacar la nave Gemini 5, especializada en observaciones espectrográficas y fotográficas de los estratos de nubes en la atmósfera, aportando información muy relevante sobre la composición y altura de estas formaciones (Figura 6.52.). Al poco tiempo se lanzó la nave Gemini 7, que tomó fotografías de la tierra con una Hasselblad de 70 mm - todo un clásico de las expediciones espaciales- así como del propio astronauta Edward White suspendido en el espacio sobre el Golfo de México. Pronto se comprendió el gran valor mediático que este tipo de imágenes iba a proporcionar a los estados, como estandartes iconográficos del desarrollo tecnológico y del poderío económico-militar, práctica que llega hasta nuestros días<sup>65</sup> (Figura 6.53.). En 1966, la Géminis 9, tripulada por cuatro astronautas, sirvió para determinar la influencia de las capas absorbentes de la atmósfera en el proceso de atenuación de ciertas estrellas. Las fotografías tomadas a 80 km de altitud demostraron que este proceso, normalmente observado desde tierra y que afectaba también a las mediciones de la sombra terrestre en los eclipses, no existía como tal, debiéndose a la acción del polvo atmosférico<sup>66</sup>. La cámara utilizada fue fabricada especialmente para fotografiar fenómenos de este tipo en condiciones de escasa luminosidad. La película expuesta fue Tri-X de Kodak, dada su amplia respuesta espectral. Además, se aprovechó la ocasión para realizar mapas de densidad de la constelación *Canis Majoris* a partir de algunos de los fotogramas expuestos (Figura 6.54.).



*Fig. 6.53.. Fotografía desde la nave  
Geminis, 7 junio de 1965.*

El siguiente destino de este tipo de naves fue la luna. El satélite ruso *Lunik III* envió en 1959 las primeras imágenes de televisión del lado oculto de la luna. Por su parte, los americanos emprendieron una serie de proyectos, como el *Ranger*, el *Surveyor* y el *Luna Orbiter*, cuyo objetivo fue hacer estudios exhaustivos de la corteza lunar con vistas al envío posterior de naves tripuladas, empresa que se

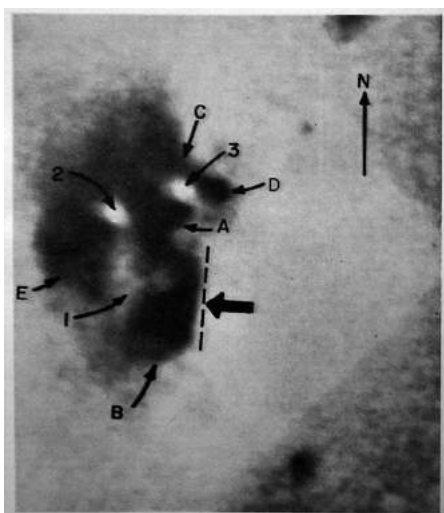




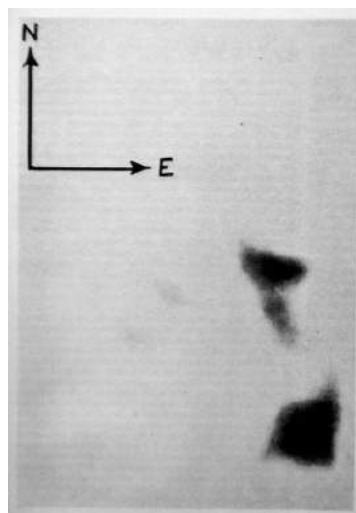
*Fig. 6.54. Mapas de densidad a partir de fotografías tomadas de la constelación Canis Majoris, desde la nave Géminis 9. Junio de 1966.*

materializó pasado unos años en el proyecto Apolo. La Ranger VII consiguió en 1964 tomar fotografías de la luna a una distancia de 750 Km<sup>67</sup>. Estas imágenes fueron tratadas posteriormente en laboratorio mediante un proceso de sub-revelado y sobre-exposición de las copias, para facilitar la interpretación de los accidentes geográficos, en especial de los detalles minúsculos del interior de los cráteres (Figura 6.55.). En esta misma línea de actuación, se fotografiaron con técnica polaroid estereoscópica modelos de cráteres en arcilla, a fin de emprender estudios comparativos de las imágenes resultantes con las fotografías

originales, y poder determinar así la verdadera dimensión, estructura y tamaño de los mismos (Figura 6.56.). Las técnicas digitales de procesamiento de la información comenzaron a hacer acto de presencia en estos proyectos a través del uso de micro- analizadores capaces de medir al detalle los negativos pertenecientes a determinados cráteres, y de generar mapas de dos dimensiones de sus contornos y tonalidades<sup>68</sup>.



*Fig. 6.55. Foto polaroid de un cráter lunar tomada desde el Ranger VII. 1965.*



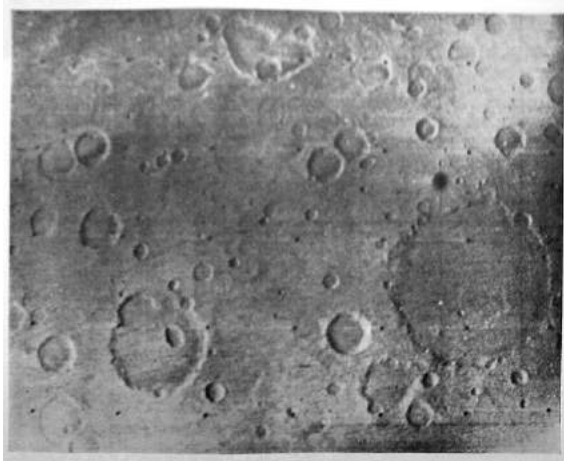
*Fig. 6.56. Tesis 3 Rocket 8. Foto polaroid de un cráter lunar tomada desde el Ranger VII; subrevelada y sobreexpuesta, interpretándose las zonas oscuras como depresiones en el terreno. 1965.*

#### **6.1.9.5. De la Luna a Marte**

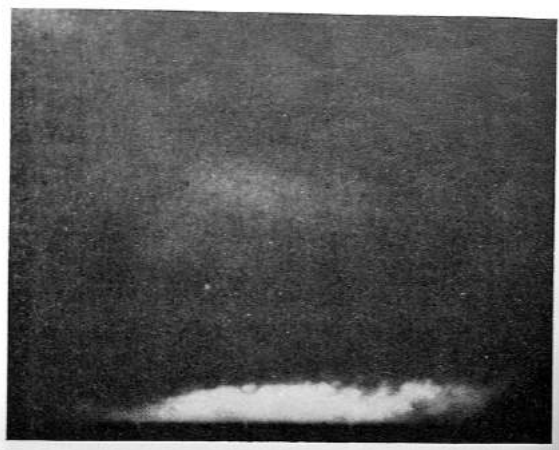
En 1965 se comenzó el envío de sondas al planeta Marte, en viajes de cinco meses de duración, y a distancias de 200 millones de millas. La Mariner 4 fue capaz de transmitir a Tierra imágenes de la corteza marciana con una resolución de unos tres kilómetros, superando ampliamente la de 140 km, propia de los telescopios emplazados en nuestro planeta. La presencia del sol y el ángulo de incidencia de sus rayos sobre la superficie de Marte, fueron decisivos para obtener un mayor o menor contraste. Las imágenes revelaron una estructura volcánica similar a la luna, con formaciones montañosas dispuestas en forma de anillos<sup>69</sup>(ver Figura 6.4). Las nuevas fotografías facilitadas por la Mariner 6 en 1969, en su aproximación al planeta, fueron tomadas a partir de imágenes de televisión de alta resolución. Fueron imágenes decisivas para desmentir la existencia de los famosos canales, atribuyéndolos a efectos ópticos<sup>70</sup>. Las imágenes realizadas a 3.000 kilómetros de distancia, ofrecieron detalles de las cápsulas polares de la superficie



marciana una vez ampliadas hasta cubrir franjas de 70 km. Los mapas de radar fueron tratados también electrónicamente para paliar el ruido de las señales y obtener mejores reproducciones. En este proyecto fueron utilizados también radiómetros para la generación de mapas de IR, espectrómetros de UV e IR, y dispositivos de telemetría por radio para determinar la composición de los polos, la masa del planeta, y las distancias exactas de separación de la Tierra (Figuras 6.57.



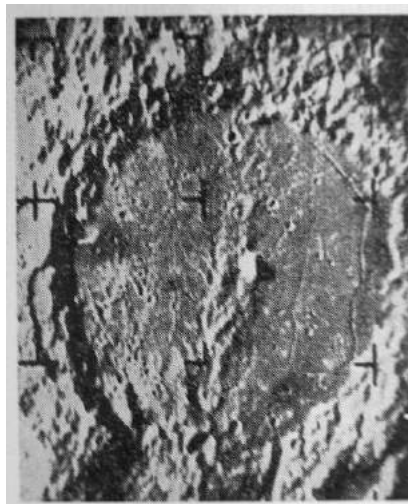
*Fig. 6.57. Fotografía de Marte hecha por el Mariner 6 a 2.150 millas de distancia. Tratada electrónicamente. 1969.*



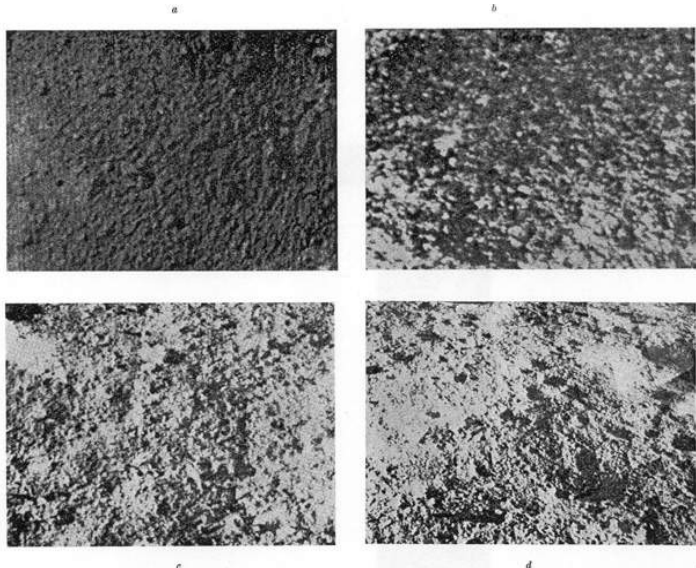
*Fig. 6.58. Fotografía de Marte hecha por el Mariner 6. Tratada electrónicamente. Cápsula polar sur. 1969.*

y 6.58.). Tal como sucedió en su día con la luna, las fotografías avivaron las discusiones en torno a las características topográficas del paisaje marciano, entre aquellos defensores de la teoría del impacto de lluvias de mini- meteoros y los partidarios de causas endógenas, tales como explosiones volcánicas<sup>71</sup>. En este mismo año 1969, se envió la Mariner 7, con la misión de fotografiar el hemisferio sur y la cápsula polar del planeta mediante un sistema de televisión capaz de grabar imágenes en color de 900 pies de resolución, y de transmitir las a la Tierra en directo<sup>72</sup>.

El año 1965 se coronó con nuevas expediciones de varias naves a la luna (Luna 9, Surveyor, Ranger 7, 8 y 9), destinadas mayormente a fotografiar su superficie desde distancias muy cercanas a ella, e incluso desde la propia corteza lunar mediante alunizajes controlados desde la Tierra. La Ranger 9 consiguió fotografiar el cráter Alphonsus con todo detalle antes de caer en la superficie lunar, hecho que permitió un análisis exhaustivo de la estructura y formación del terreno. Los estudios comparativos de estas imágenes con las formaciones volcánicas situadas en la montaña Pelée en La Martinica, fueron de gran ayuda para las tesis defensoras del origen volcánico de la superficie lunar<sup>73</sup> (Figura 6.59.). Al año siguiente, el Lunar Orbiter II acometió tareas similares con el cráter Copérnico, esta vez, con imágenes tomadas a una altura de 45 km que lograron mostrar vivamente las características del mismo: un diámetro



*Fig. 6.59. Fotografía del cráter Alphonsus, hecha desde el Ranger IX. 1966.*

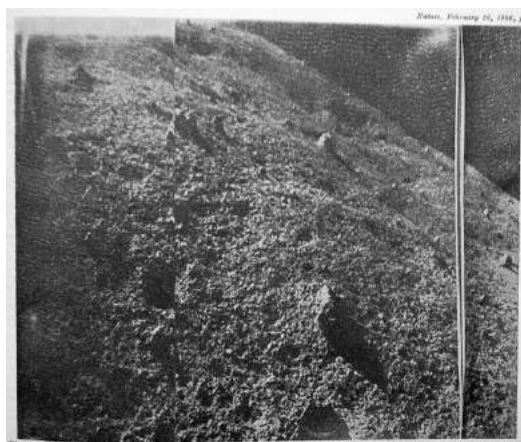


**Fig. 6.60. Imágenes de la superficie lunar tomadas por las naves Surveyor (a,c y d); y Luna 9 (b) tras alunizaje. Resolución de 0.05 cm.1966.**

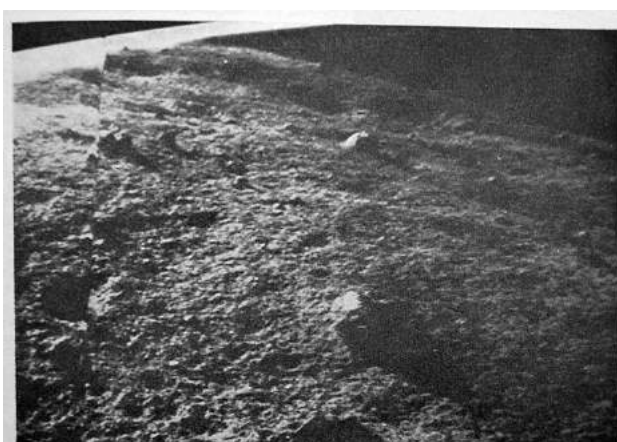
de 96 km, una profundidad de 3,2 km, y una altura de sus colinas de 300 metros. Las primeras imágenes en detalle de la superficie lunar, tomadas por las naves Surveyor y Luna 9, tras su alunizaje, reavivaron la polémica sobre las causas de la formación del paisaje lunar (Figura 6.60.). Las tesis defensoras del impacto de los meteoros como probable origen de la rugosidad característica de la luna, se basaban en gran medida en las imágenes aportadas por estas expediciones y en observaciones efectuadas desde tierra con tecnología radar, radio, y de IR<sup>74</sup>. Las fotografías obtenidas con la

sonda Luna 9 fueron realizadas a partir de imágenes de televisión transmitidas a la Tierra. Para ello, se utilizó tecnología fax con una velocidad de barrido de una línea por segundo. Las señales fueron grabadas en un vídeo-cassette Ampex, y registradas e impresas digitalmente cada dos segundos. Una vez que la nave se encontró en la superficie de la luna comenzó a emitir señales de fax que fueron acumulándose hasta producir una serie de fotografías, a razón de una imagen cada dos horas aproximadamente. En la Universidad de Manchester pudieron acceder a este material con la ayuda de un convertidor de señales y un receptor de imágenes prestados por el periódico *Daily Express*<sup>75</sup> (Figuras 6.61. y 6.62.). De todas las sondas enviadas a la superficie lunar, fueron las soviéticas las que consiguieron unas imágenes de mayor calidad. En ello, fue crucial el nivel de resolución obtenido (en el caso de la Luna 9 fue de medio centímetro), y la hora exacta en que fueron expuestas, siendo muy importante la altitud del sol<sup>76</sup>.

Para finales de 1968, se contaba con material fotográfico suficiente de la práctica totalidad de la superficie lunar. El proyecto *Orbiter*, por sí sólo, había cubierto el 99% de esta geografía con utilización de rollos de películas de 70 mm,



**Fig. 6.61. Fotografía de la superficie lunar desde la nave Luna 9, 1966.**



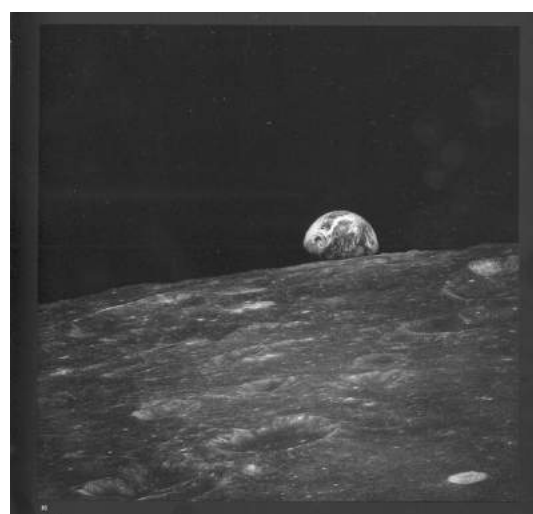
**Fig. 6.62. Reconstrucción de la fotografía anterior ( 5.131).**



procesados *in situ* y enviados posteriormente por tecnología radio a las estaciones terrenas. Esto permitió un conocimiento exhaustivo de la corteza lunar con niveles de resolución de un metro, muy por encima de las imágenes transmitidas por televisión, propias de otros proyectos. Esta fue una de las razones por las que el proyecto Apolo 8, que envió en 1968 la primera nave tripulada a la órbita lunar, fuera criticado de innecesario por algunos científicos. Se puso en duda que las nuevas imágenes tomadas de la geografía lunar pudieran aportar alguna información adicional a las ya existentes<sup>77</sup>. Para esta ocasión, fue utilizada una Hasselblad EL (Electric) de disparador automático, con lentes Sonnar de diferentes longitudes focales, y películas en color y blanco y negro, fabricadas de forma especial por Kodak<sup>78</sup>. Además de este equipo fotográfico, la nave estaba equipada de una cámara de televisión, una cámara cinematográfica de 16 mm, diversos fotómetros, filtros y equipos accesorios. Las fotografías del Apolo 8 presentaron la gran ventaja de que los negativos quedaron en manos de los astronautas por lo que las copias resultantes ofrecieron una gran mejora en cuanto a la reproducción de los tonos de gris (Figura 6.63. y 6.64.). Las fotografías en color fueron por el contrario un tanto decepcionantes por ser el paisaje lunar prácticamente monocromático, con un tono grisáceo generalizado. No obstante, se realizaron numerosas fotografías con el uso de distintos filtros para procurar un mayor contraste entre las diferentes partes del paisaje lunar, redundando en imágenes de gran belleza (Figuras 6.65. y 6.66.). Una vez más, los intereses políticos y mediáticos intervinieron en los proyectos científicos dedicados al espacio. Fueron momentos históricos profundamente condicionados por nuevos medios de comunicación de masas en los que la imagen cobraba mayor importancia cada día (Figura 6.67.). Desde entonces, los proyectos



**Fig. 6.63.**  
*Fotografía de la luna desde el Apolo 8. 1968.*



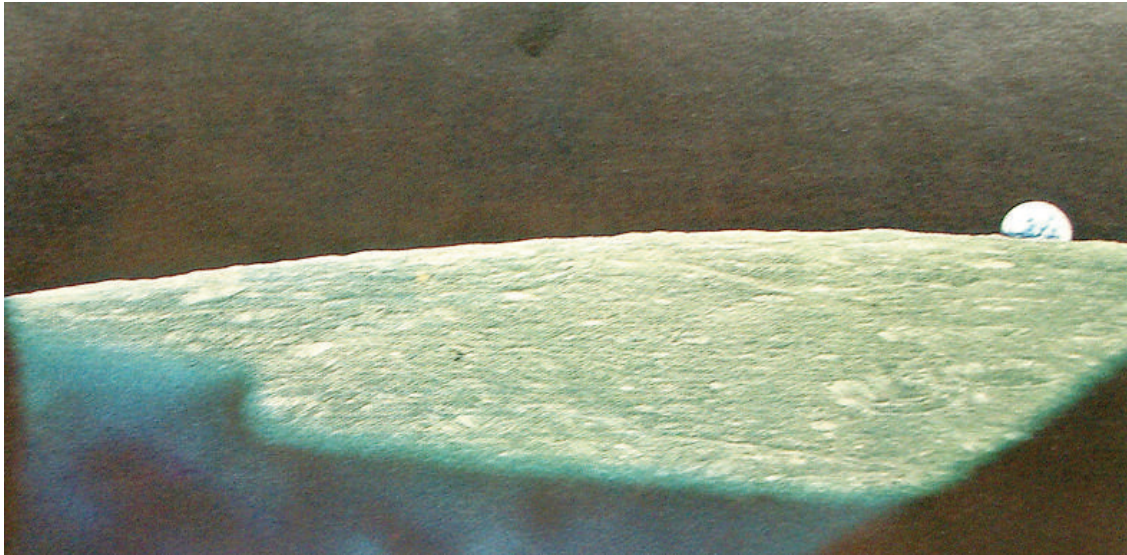
**Fig. 6.64.** *Fotografía de la puesta de la tierra por el horizonte lunar, tomada por el Apolo 8, con una cámara Hasselblad de 70 mm, el 24 diciembre 1968.*



**Fig. 6.65.** *La luna desde el Apolo 8. 1968*



**Fig. 6.66.** *La luna desde el Apolo 8. 1968*



*Fig. 6.67. Fotografía de la luna en primer plano y al fondo la Tierra. Desde el Apolo 8. 1968*

espaciales y, en particular, los de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) no han escatimado recursos para cubrir todos sus eventos con despliegues mediáticos repletos de toda suerte de imágenes relativas a los lanzamientos, a las naves en órbita, astronautas en vuelo, etc. El evento que coronó este tipo de aspiraciones científico- mediáticas fue indudablemente el proyecto Apolo 11, con las primeras imágenes del hombre pisando la luna, un 19 de julio de 1969 (Figura 6.68.).

#### **6.1.9.6. Hacia la era digital**

A mediados de la década de los setenta, el proyecto Apolo llegó a su conclusión con el envío de su nave número diecisiete. El equipo fotográfico que solía acompañar estas expediciones fue en la mayoría de los casos cámaras Hasselblad, Maurer de 16 mm (cine), cámaras de TV en blanco y negro, y en color (Figura 6.69. y 6.70.), cámaras estereoscópicas de aproximación para fotografiar detalles de la superficie lunar, y cámaras Hasselblad modificadas para estudios de medición del terreno (Figuras 6.71., y ver Fig. 2.39). El Apolo 15 incorporó una cámara panorámica (Itek KA80-A) con negativos de 45.24 x 4.5 pulgadas, capaz de cubrir una superficie de 211 x 13,5 millas con cada fotograma. Con esta cámara se hicieron tomas estereoscópicas con película Kodak Panatonic-X y Plus X, especiales para fotografía aérea (Figura 6.72.). A partir de 1970, el programa Apolo de la NASA desarrolló la tecnología *Silicon Intesifier Vidicon* para la transmisión en



*Fig. 6.68.. Apolo 11. Pisada*



*Fig. 6.69. Fototesis 6. Apolo 12a. Astronauta con cámara. Apolo 12. 1969.*



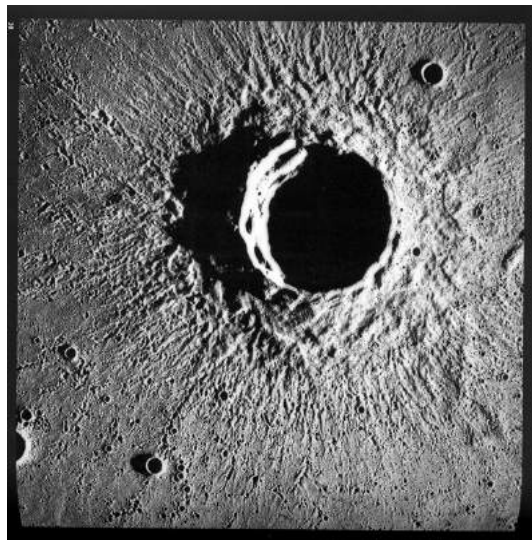
*Fig. 6.70. Imagen de TV del desprendimiento de parte del fuselaje del Apolo 16.*



directo de imágenes de televisión. En 1971 y 1972, como extensión del programa Surveyor, se inició el programa Mariner 9 para el estudio del planeta Marte. Esta sonda estuvo equipada, como los anteriores Mariner 6 y 7, con cámaras de TV de diferentes longitudes focales, y de características técnicas superiores a la TV convencional<sup>79</sup>.



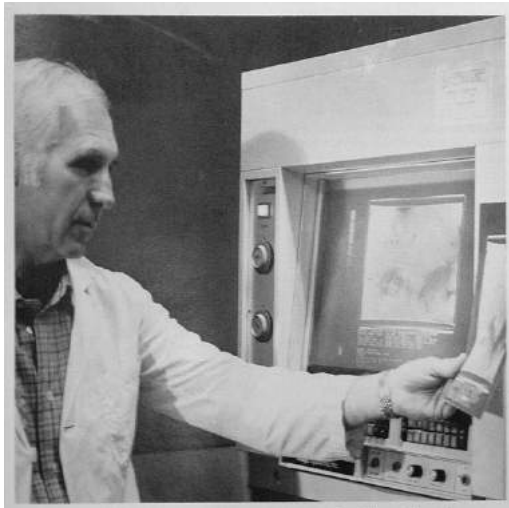
*Fig. 6.71. Cráter Bessel fotografiado con cámara de medición, de negativo B/N. Apolo 17, Dec. 1972.*



*Fig. 6.72. Cráter lunar desde el Apolo 15, fotografiado con cámara de medición, julio-agosto 1971.*

Los programas espaciales en su conjunto contaron desde sus orígenes, con una infraestructura terrestre destinada al análisis de los datos proporcionados por los satélites, naves y cohetes. En estos centros, los datos se recibían por medio de antenas de radio, y eran procesados por ordenadores. La información era almacenada en soporte magnético, tanto en cintas convencionales como de vídeo, y transmitida a diferentes centros de investigación y control, principalmente el Jet Propulsion Lab, universidades e institutos tecnológicos. En el proyecto de recogida de información participaron numerosas estaciones de radio repartidas por la geografía del planeta, incluida una en la provincia de Madrid. Las señales recogidas por cada una de las estaciones se grababan en cintas magnéticas y se enviaban al Jet Propulsion Lab, encargado en este caso de centralizar la información. Para la grabación de imágenes se utilizó una combinación de técnicas denominada MTVS (Mission and Test Video System) donde la imagen vídeo recibida se transfería a película Kodak SO.280, de 70 mm, junto a datos de identificación alfanumérica, escala de grises, e histogramas del material vídeo en bruto. Los monitores de recepción de las señales solían ofrecer imágenes en blanco y negro, comprimidas a 580.000 píxeles, con 64 valores de gris posibles. Los histogramas se encargaban de mostrar tanto la señal vídeo, como la transferida a soporte fotográfico, gracias al sistema MTVS. Además, toda esta información grabada en soporte magnético y fotográfico servía de base para producir gráficos de espectrometría UV (UVS), de interferometría y espectrometría de IR (IRIS), así como de datos telemétricos. Por último, la información aparecida en pantalla podía ser registrada fotográficamente mediante una cámara acoplada al monitor de tubo (CTR).

La superabundancia de información de datos e imágenes procedentes del espacio, ayudó a la tecnología digital de procesamiento de la imagen a dar sus primeros pasos. Sus bases tecnológicas comenzaron a fijarse a partir de 1963, cuando las naves norteamericanas enviadas al espacio fueron equipadas con ordenadores digitales, y una vez que el proyecto Apolo incentivó el uso de

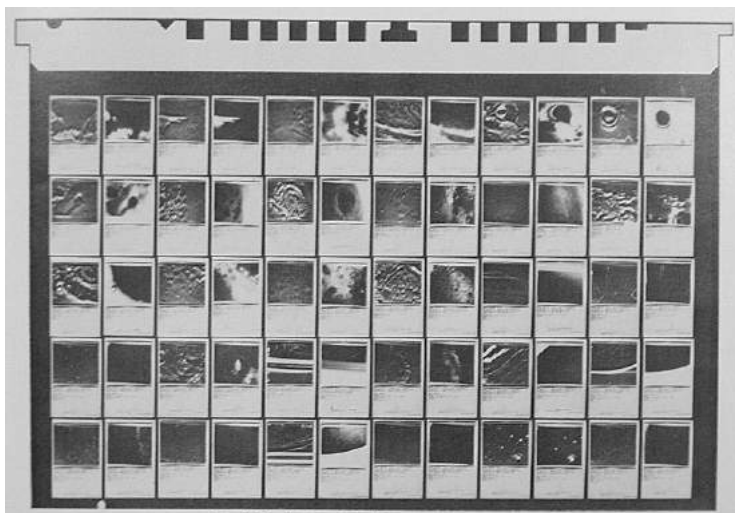


**Fig. 6.73. Ordenador con impresora recibiendo imágenes de los programas espaciales. NASA. 1968.**

simuladores aplicados a los vuelos y a operaciones de astronautas realizadas en condiciones extremas: falta de gravitación, vacío, temperaturas límites, etc. La nave Ranger 7, lanzada en 1964, fue pionera en este sentido, al enviar a la tierra imágenes de TV que fueron procesadas por los ordenadores de la época, fundamentalmente para corregir distorsiones. La combinación de estas dos tecnologías de la imagen la encontramos también en las fotografías de la luna proporcionadas por la Ranger 8, dos segundos antes de su impacto contra la superficie del satélite<sup>80</sup>. Esta primera andadura en el retoque digital de las imágenes continuó en los proyectos Surveyor, Mariner y Apolo<sup>81</sup>. En el caso de los Mariners, se dispuso de un amplio despliegue de medios tecnológicos de la imagen, desde fotografía convencional a

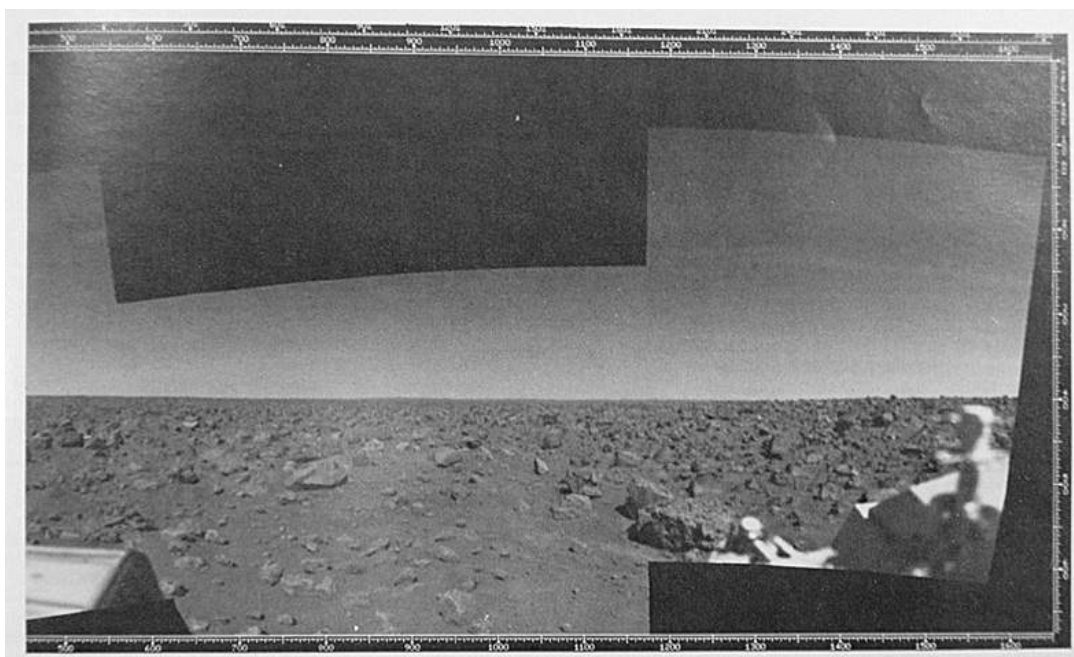
cámaras de TV con tecnología Vidicom, grabadores de vídeo y procesamiento digital de las señales<sup>82</sup>.

La aplicación de la tecnología digital en estos programas espaciales afectó también al registro fotográfico de la imagen generada por tubos de rayos catódicos, consiguiéndose un mayor control y precisión de las operaciones, así como de la impresión de copias realizada en papel fotográfico o por medios reprográficos<sup>83</sup> (Figura 6.73.). La llegada constante de datos relativos a las imágenes procedentes de las naves en el espacio, obligó a la puesta en práctica de sistemas integrales de procesamiento de la información, como el COSATI, un sistema informático de tecnología digital, ideado en 1966 por H. W. Hoadley para la NASA. Estaba basado en microfichas recopiladoras de datos y mapas gráficos, con capacidad para reproducir las imágenes recibidas por medio de impresoras de procedimiento xerográfico (Figura 6.74.). Para 1976, la nave *Viking* sin tripulación hacia Marte, puso a prueba este tipo de tecnología en distancias descomunales. Tan pronto como aterrizó en la superficie del planeta, tras un viaje de 11 meses y 460 millones



**Fig. 6.74. Microficha para procesar las imágenes procedentes del espacio, con escala de tonos, datos de almacenamiento, etc. Mariner 1971- 2.**

de millas, se comenzaron a recibir imágenes en color y blanco y negro de la superficie del planeta. Para ello, se utilizaron dos cámaras LCS Itek (Lander Cameras Systems) de 7 kilos de peso, que funcionaban con tecnología fax (facsimilar camera). En esta ocasión, se pusieron a prueba nuevos fotosensores de material semiconductor, cercanos a la tecnología CCD. Las señales digitalizadas se enviaron a tierra a través de satélite, donde se grabaron en cinta magnética, y se transfirieron a película fotográfica (Figura 6.75.).



*Fig. 6.75. Imágenes enviadas por la nave Viking desde Marte. 1976.*

A principio de los setenta, la tecnología espacial entró en una nueva fase del estudio interplanetario con la llegada de los laboratorios y plataformas espaciales. Una de las primera experiencias propuestas fue el diseño del HEAO (High Energy Astronomical Observatory), una nave de proporciones gigantescas, controlada desde tierra, y capaz de albergar toda la instrumentación astronómica necesaria para la exploración del espacio (telescopio de rayos X, tubos de imagen, polarímetros, espectrómetros)<sup>84</sup>. Este traslado del conjunto de la instrumentación astronómica al espacio, fue posible gracias al fuerte avance experimentado por la tecnología de transmisión de datos a distancia. En este sentido, la tecnología *PCM* (Pulse Code Modulation) de procesamiento digital de las señales, y las de multiplexado por división de frecuencia y por división temporal, ambas desarrolladas en el ámbito de las telecomunicaciones, fueron determinantes. Este tipo de proyectos se materializó con el tiempo en el lanzamiento en 1973 del *Skylab*, equipado con un telescopio especializado en la observación y toma de imágenes del sol; del *LST* (Large Scale Telescope) de la NASA, de 120 pulgadas de diámetro y 0.05 arcos de resolución, en órbita de 350 millas náuticas alrededor de la tierra; de la estación espacial *MIR*, y del programa *Space Shuttle*. El envío continuado de satélites, naves, estaciones, globos y sondas por la extensa geografía del universo, como continuación de un proyecto que comenzó de forma rudimentaria con los paseos en globo de Nadar por el cielo de París, no ha hecho más que confirmar el importante papel que la imagen tecnológica desempeña en el conocimiento de mundos inhóspitos y lejanos. Por el camino inverso, la ciencia se ha tenido que enfrentar también a otro universo, tan inconmensurable y enigmático como el cosmos, al adentrarse en la observación del mundo diminuto e invisible de lo microscópico.

## 6.2. La imagen de lo diminuto

El interés de la ciencia por el universo diminuto e invisible es consustancial a su nacimiento. En la cultura occidental, nacida a orillas del Mediterráneo, los indicios más sólidos de esta curiosidad los encontramos en la formulación de la filosofía atomista por Demócrito y Leucipo. Los límites a la observación que existían



entonces para adentrarse en la naturaleza íntima de las cosas, cuando sólo se disponía de los ojos desnudos o de algún cristal o espejo de aumentos, obligaron a establecer inferencias muy atrevidas a partir de lo palpable y visible. El universo atómico de esta escuela griega obedecía a deducciones propias de un método experimental primitivo, no por ello, ajeno a principios científicos.

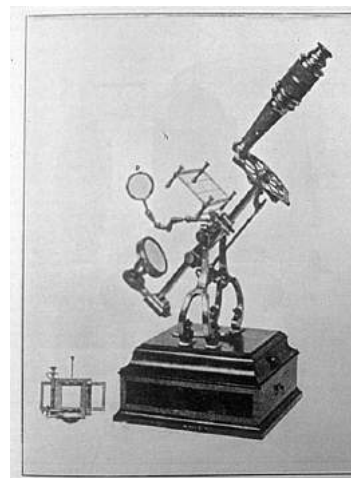
*Puesto que te he enseñado que los seres  
no pueden engendrarse de la nada,  
ni pueden a la nada reducirse;  
no mires con recelo mi enseñanza,  
al ver que con los ojos no podemos  
descubrir los principios de las cosas;  
si embargo, es preciso que confíes  
que hay cuerpos que los ojos no perciben .<sup>85</sup>*



**Fig. 6.76.**  
*Quinta  
placa de los  
músculos.  
Del  
Bruxellensis  
Icones  
Anatomicae,  
de Andreas  
Vesalio.  
1539- 41.*

Muchos siglos hicieron falta para que las técnicas de observación de lo infinitamente pequeño pudieran perfeccionarse. Los estudios ópticos de Alhazen, desarrollados en el siglo X de nuestra era, son un claro antecedente de este empeño, influyendo en los trabajos de Roger Bacon y de otros científicos europeos, precursores a su vez de la construcción de los primeros microscopios. La invención del microscopio compuesto a finales del siglo XVI, por Z. Jansen, óptico de la ciudad de Middelburg, supuso un salto cualitativo muy importante en este camino de exploración de lo ínfimo<sup>86</sup>. Son años de formación de la ciencia moderna, impensables sin la presencia de este instrumento, o del telescopio, aparecido unos

años más tarde. No es fortuito que el avance de la óptica coincidiera con el establecimiento de utensilios más conceptuales y abstractos como la perspectiva, las leyes de la reflexión y la refracción, o los métodos deductivo e inductivo, desarrollados por Galileo y Kepler, y Francis Bacon, respectivamente. La imagen científica resultante de esta nueva exploración hacia el interior de la materia quedó plasmada en grabados y dibujos que mostraron los detalles de plantas y animales, ocultos hasta entonces a la visión humana. Los grabados de Andrea Vesalio, publicados en 1547 en su obra *De Corporis Humani Fabrica* (Figura 6.76.), o los dibujos de 1664, de la *Micrographia* de Robert Hooke, marcaron el inicio de una tradición que continúa hasta nuestros días. Sin embargo, para encontrar un trabajo riguroso de micrografía, apoyado en los instrumentos ópticos de aumento más comunes de la época, hubo que esperar a 1747, fecha de publicación de la *Micrographia Illustrata* de George Adams, una obra maestra de la representación microscópica. Se trata de 65 láminas de un tamaño aproximado de 13x18 cm, elaboradas con todo detalle y precisión, e ilustrativas del mundo animal y vegetal, especialmente de insectos, tejidos y bulbos (Figuras 6.77. y 6.78.). Esta obra adquirió gran notoriedad en los ambientes científicos de la época, y se considera hoy precursora directa de la fotomicrografía.



**Fig. 6.77.** *Aparato para  
micrografía. G. Adams. c.a.  
1750.*



Obvia decir que la representación científica del universo minúsculo y oculto a la visión directa de los ojos, mediante el dibujo, se ha convertido en una práctica que llega hasta nuestros días. Sirva de ejemplo, la extraordinaria labor realizada en este sentido por Santiago Ramón y Cajal, con obras al agua tinta, basadas en el método de la *reacción negra* o *método de Golgi*, tan decisivas para el avance de la neurología<sup>87</sup>. (Figura 6.79.). La ilustración presentada en forma de dibujos, grabados, fotografías retocadas, o animaciones informáticas, cumple una función de gran utilidad en la ciencia, toda vez que priman los intereses expositivos y de comunicación, o que se quiere resaltar determinadas partes de un objeto, aislándolo del fondo<sup>88</sup> (Figura 6.80.)

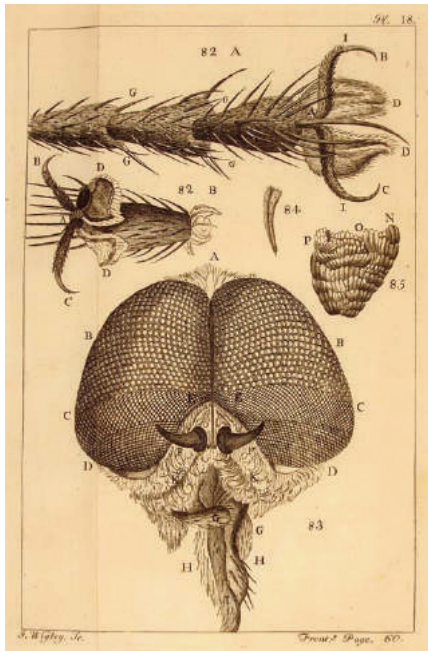


Fig. 6.78. Láminas 18 y 19 de la *Micrographia Illustrata*, de G. Adams. 1747.

Las herramientas puestas al servicio de la exploración científica del mundo atómico y minúsculo han ido proliferando a lo largo de la historia (Figura 6.81.). Un largo camino se ha recorrido desde las primeras lentes de aproximación con capacidad de aumentar la imagen a varios diámetros, tales como lupas y formas primitivas de microscopios simples, hasta las técnicas de vanguardia actuales, tan refinadas y precisas, como la *microscopía de efecto túnel*, o *STM* (Scanning Tunneling Microscopy.), que se aproxima a resoluciones de nivel atómico (Ver Figura 2.40), o la *microscopía de campo iónico*, *FIM* (Field Ionic Microscopy), que permite el estudio en detalle de los movimientos de átomos, moléculas y agrupaciones atómicas<sup>89</sup>. alguna de ellas han sido ampliamente comentadas en estas páginas, como el microscopio electrónico, la cámara de niebla y de burbujas, los aceleradores de partículas o la espectroscopía por difracción de rayos X. En este capítulo, se presentan algunas de estas técnicas en mayor profundidad, y se completa la información con otros procedimientos que han sido decisivos en esta prospección del universo interno de la materia, haciendo especial hincapié en

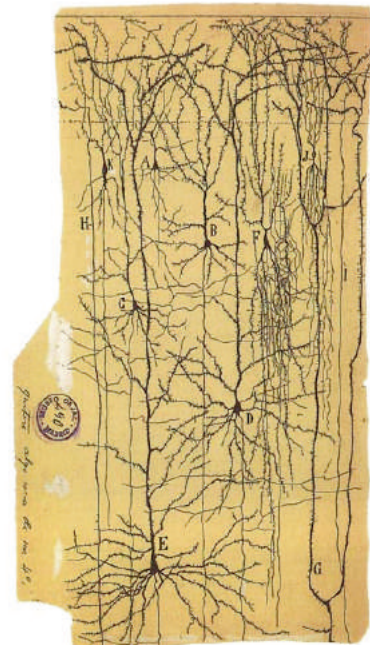


Fig. 6.79. Representación de las tres primeras capas del giro precentral del cerebro de un niño. 1892. Santiago Ramón y Cajal.



Fig. 6.80. Grabado de un feto en útero. 1774.



Fig. 6.81. Aparato para el dibujo microscópico, con prismas y espejos. 1929.

aquellas que guardan una relación más estrecha con la formación de imágenes y que ofrecen datos muy relevantes sobre la función de la fotografía en la era electrónica, tema central de esta obra. Por consiguiente, se acometerá una revisión de los avances ocurridos hasta la fecha límite de este trabajo, en áreas como la fotomicrografía, la microscopía electrónica aplicada al estudio de las emulsiones fotográficas, las técnicas fotográficas y fotoeléctricas al servicio de la física nuclear, la generación de imágenes derivadas del uso de la radioactividad, y la difracción de rayos X aplicada a la biología molecular.

### 6.2.1. De la fotomicrografía óptica a la electrónica

Los intentos por fotografiar objetos diminutos anteceden curiosamente a la propia aparición de la fotografía. A partir de 1802, los trabajos de Wedgwood en pro de conseguir un procedimiento fotográfico por medio de las sales de plata, le llevaron a realizar proyecciones de objetos microscópicos sobre papeles bañados en este tipo de sustancias químicas. Pero no fue hasta 1835 y 1836 que se obtuvieron resultados más prácticos en esta dirección, una vez que fijadores como el hiposulfito de sosa fueron utilizados, entre otros, por J. B. Reade, y el mismo Fox Talbot<sup>90</sup>. Reade consiguió fotografiar una pulga haciendo uso de una tira de cuero emulsionada con una amalgama fabricada con hiel (gall) y cloruro de plata, que expuso a la luz solar durante cinco minutos<sup>91</sup>. La técnica del daguerrotipo fue aplicada de forma inmediata en estas tareas. Alfred Donné fotografió en 1839 los ojos de una mosca mediante esta técnica en los laboratorios de la Academia de las Ciencias de París. Esta placa marcó el inicio de su *Atlas de anatomía microscópica*, obra completada en 1844. Posteriormente, este

mismo autor completó un nuevo proyecto junto a Léon Foucault, titulado *Atlas del curso de microscopía complementario de los estudios medicinales* (*Atlas de cours de microscopie complémentaire des études médicales*), donde fueron incluidos numerosos grabados realizados a partir de daguerrotipos<sup>92</sup> (ver Figura 2.28). En esta primera fase experimental, se utilizó mayormente el microscopio solar, pero pronto comenzaron a aplicarse nuevas técnicas de iluminación, como las lámparas de alcohol o de benceno, y las de arco eléctrico en combinación con dispositivos de proyección, provenientes de la microfotografía<sup>93</sup> (Figuras 6.82. y 6.83.). Con los años, la fotomicrografía fue decantándose por dos métodos fundamentales en el empleo de la luz: el de transmisión y el de reflexión, prácticas continuadas posteriormente por el resto de microscopías, incluidas la electrónica y la de rayos X. En el método de transmisión, la luz atraviesa el espécimen y produce una imagen de acuerdo con los niveles de luz absorbida y transmitida por el mismo, tal como sucede con la proyección de una diapositiva sobre una pantalla. Para ello, es necesario que la muestra sea extremadamente fina y transparente, para lo que existen técnicas muy sofisticadas de preparación. En el segundo, por el contrario, la luz incide sobre la muestra, que es opaca, dando lugar a una imagen que es



producto de los distintos niveles de intensidad de luz reflejada por la misma. A partir de estas dos técnicas básicas, que hoy reciben los nombres de *diascópica* y *episcópica*, respectivamente, la fotomicrografía ha desarrollado una serie de procedimientos adicionales, aprovechando otros fenómenos producidos por la luz, tales como la interferencia, la polarización, el contraste de fase, la fluorescencia, o la transmisión a través de filtros. A su vez, se han desarrollado distintos métodos de iluminar los objetos, lo que ha redundado en una serie de técnicas de fotomicroscopía muy particulares, como son,

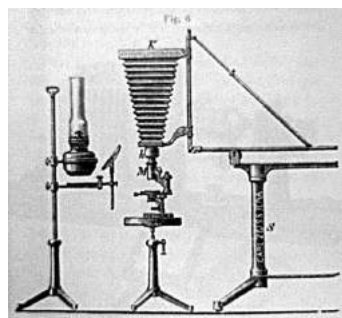


Fig. 6.83. Dispositivo de iluminación para fotomicrografía. R. Koehler. 1892.

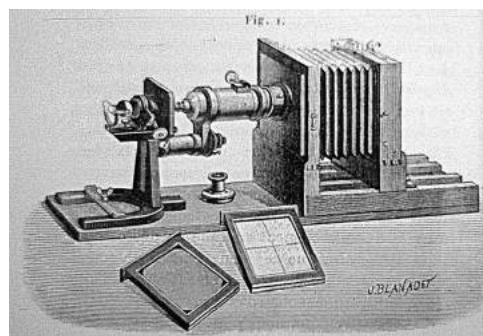


Fig. 6.82. Microscopio aplicado a la cámara oscura.

entre otras, las de *campo iluminado*, *luz de contra*, *iluminación Kohler*, de *fondo negro*, *iluminación Rheinberg*, o la de *modulación de contraste Hoffman*. Por último, la microscopía se ha visto enriquecida notablemente por el uso de radiaciones no visibles, tales como la UV, IR, rayos X, o por fenómenos como el ultrasonido. Cada uno de estos procedimientos por separado, y en combinación entre ellos, ha dado lugar a multitud de técnicas que han convertido la fotomicrografía en una de las herramientas más poderosas y de mayor trascendencia en la historia de la ciencia de los dos últimos siglos. Su presencia en campos como la botánica, la biología molecular, la metalografía, o la medicina ha sido decisiva (Figura 6.84.). En la actualidad, las técnicas digitales de procesamiento de imágenes están aportando nuevas herramientas destinadas a mejorar parámetros tan determinantes como la resolución y el contraste de las imágenes, al tiempo que han logrado enmarcar el conjunto de estas operaciones bajo el concepto general de tratamiento de la información. Adicionalmente, han generado nuevas formas de presentación de resultados mediante la utilización del color, aspecto que entra de lleno en el eje de las discusiones antes comentadas sobre la necesidad de fijar los límites entre lo veraz y lo recreado, o entre la imagen como *analogon* y la imagen como extensión manipulada de lo observado.

*Dependiendo de las condiciones de iluminación, de la integridad del espécimen y de los métodos de preparación, las imágenes digitales capturadas por el microscopio óptico demandarán una cantidad considerable de rehabilitación para conseguir un punto de compromiso entre la fiabilidad científica, el equilibrio cosmético y la composición estética.<sup>94</sup>*

Hasta conseguir este grado de perfección y refinamiento en el campo de la fotomicrografía fueron necesarios muchos años de esfuerzo por parte de los ópticos y de los científicos involucrados en el estudio de la fotografía. Desde la invención del microscopio compuesto a finales del siglo XVI hasta principios del siglo XIX, la mayoría de los microscopios fueron contruidos de forma artesanal por cada uno de los científicos. Por tanto, los errores eran corregidos por aproximación, y la construcción no seguía una metodología concreta, o su diseño no estaba sujeto a principios sistemáticos y definidos. De aquí, que fuera frecuente que muchos microscopistas siguieran utilizando microscopios simples hasta bien entrado el siglo XIX por sus mejores resultados. Este es el caso de los

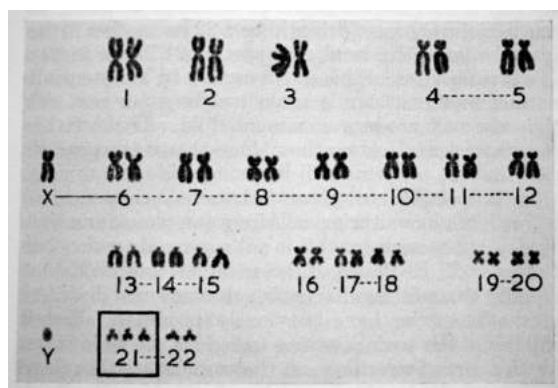


Fig. 6.84. Fotografía del kariotipo de una trisomía del par 21.

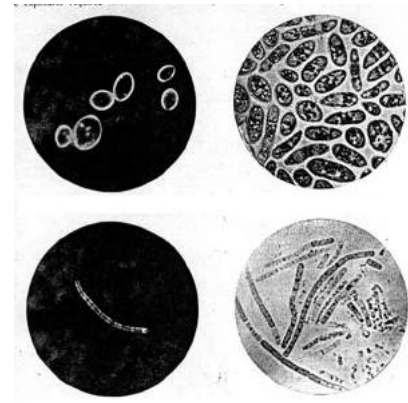
microscopios simples y lupas contruidos por Anton von Leewenhoek hacia 1600, que gozaron de un gran prestigio entre sus contemporáneos. Entre ellos, cabe destacar al pintor Johannes Vermeer, amigo personal de este artesano, cuyos lienzos respiran una gran influencia de este tipo de óptica a decir por la representación lograda de la luz, tan sutil y delicada. En 1758, John Dolland inventó las lentes acromáticas, permitiendo la construcción de telescopios libres de aberraciones cromáticas, e imponiendo un nuevo modo de hacer en óptica que revitalizó el uso de los microscopios compuestos

hacia finales de siglo. A principios del siglo XIX, los trabajos de Young y Fresnel sirvieron para aportar una base teórica más rigurosa a las teorías ondulatorias de la luz, hecho que redundó en nuevos y mejores métodos de construcción de instrumentos ópticos. La fotografía fue aplicada desde un principio al microscopio compuesto fundamentalmente, entre otras razones, porque a diferencia del simple en el que la imagen que se forma es de carácter virtual, éste logra crear una imagen real del objeto sobre un plano que puede ser observado directamente, o registrado por una placa fotográfica.

Hacia 1880, el físico y óptico Ernst Abbe aplicó los conceptos de la óptica ondulatoria a la resolución de los microscopios, señalando que nuestra capacidad de discriminar e identificar objetos o puntos situados a la menor distancia posible dentro de una imagen, depende de la longitud de onda de la luz utilizada para iluminar la muestra, y del *ángulo de aceptación* de la misma, o ángulo de visión cuyo vértice sería el eje de la lente y sus extremos los límites del objeto. Mientras más cerca estamos de un objeto, mayor es este ángulo y mayor nuestra capacidad de discriminar detalles en el mismo. En el caso de la retina, el ángulo de aceptación idóneo para discriminar detalles en una imagen es el que se forma cuando situamos nuestros ojos a una distancia de 25 cm respecto del objeto. En los sistemas ópticos para microscopía intervienen otras variables que completan este cuadro, principalmente la apertura numérica (N.A) del objetivo<sup>95</sup>, la formación de discos de difracción de Airy, la longitud focal y la apertura del diafragma del objetivo<sup>96</sup>. Abbe hizo especial hincapié en la distinción de dos fases bien definidas en la formación de una imagen en el microscopio tras otorgar un papel de preponderancia y delimitador al *plano focal posterior* del sistema, o punto de confluencia de la luz procedente de la fuente de iluminación. El proceso primario estaría formado por el camino que conduce a la luz desde la fuente de iluminación a este plano focal posterior, tras haber pasado a través del diafragma de dicha fuente, el condensador, el objetivo y la muestra. Al introducirse esta última en el camino del haz de luz se produce una serie de fenómenos de interferencia en el plano focal posterior (refracción, difracción, absorción, polarización, retraso de fase), que son debidos a las características físicas del objeto. A partir de ahí, se inicia la segunda fase, que conduce a la formación de la imagen en el plano de interferencia, formado por múltiples imágenes secundarias, y susceptible de ser observadas o fotografiadas. Esta es una de las razones por las que la fotomicrografía, para avanzar en la conquista de mayores niveles de resolución y de mayor contraste en sus imágenes tuvo que ingeniar fórmulas de actuación dirigidas a tres áreas fundamentales: nuevos métodos de iluminación, nuevas fuentes de luz y de radiaciones, y mejora de los materiales fotosensibles.



Hacia principios del pasado siglo, se dieron pasos muy importantes en esta dirección, especialmente gracias a las contribuciones de A. Koehler, tanto en lo que respecta al nuevo método de iluminación de especímenes que lleva su nombre, como a partir de la puesta en práctica de la *microscopía ultravioleta*. La iluminación Koehler supuso un grado de perfeccionamiento respecto de las técnicas anteriores, considerándose, aún hoy día, la más versátil y útil en el ámbito de la microscopía óptica<sup>97 y 98</sup>. También se debe a este autor la propuesta, en 1904, de utilizar cristales de cuarzo y de fluorita para conseguir luces de menor longitud de onda que la visible, en la región ultravioleta del espectro<sup>99</sup>. Esto abrió un campo de exploración nuevo a la fotomicrografía, traducido en niveles de resolución mayores y en poder desvelar estructuras y rasgos de los materiales hasta entonces desapercibidos. El método utilizado siguió en líneas generales el procedimiento Koehler para luz visible, con la diferencia de que la fuente de iluminación, en este caso, era un arco eléctrico al que se anteponía dos prismas de cuarzo para lograr la transmisión exclusiva del ultravioleta. Posteriormente, para hacer visible este tipo de radiación y conseguirse un campo de iluminación intenso y uniforme sobre la muestra comenzó a utilizarse una pantalla fluorescente<sup>100</sup> (Figura 6.85.).



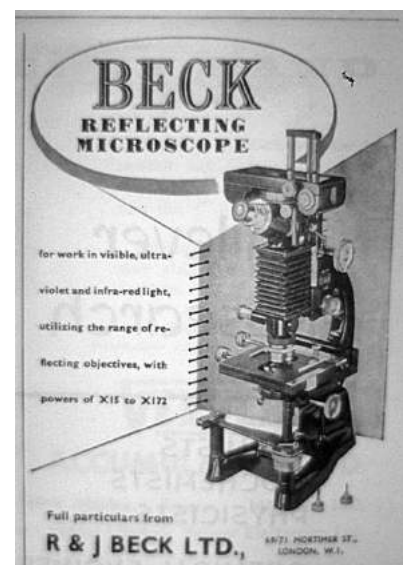
**Fig. 6.85. Bacilos microfotografiados con técnicas de: luz concéntrica de fondo negro (izda.), y con luz ultravioleta (dcha.). 1920. J. E. Barnard. 1920.**

Con el paso de los años se pusieron en práctica objetivos reflectores para microscopios, retomándose una tradición iniciada por Newton. Este tipo de microscopios, de funcionamiento con espejos, proporciona índices de apertura muy altos y una ausencia de acromatismo, características que lo hacen idóneo para espectromicrofotografía y para fotografiar tanto en el UV como en el IR por medios convencionales y fotoeléctricos<sup>101</sup> (Figura 6.86. y 6.87.). La combinación de elementos refractores y reflectores en microscopía posibilitó posteriormente la construcción de nuevos objetivos, denominados *catadióptricos*, muy aconsejables para lograr índices de acromatismo muy elevados en el espectro visible y en el UV.



**Fig. 6.86. Microscopio reflector con cámara fotográfica. Especial para espectrografías, no tiene lentes, sólo dos superficies reflectoras. 1953.**

**Fig. 6.87. Microscopio reflector para uso con luz visible, UV, e IR. 1957.**



### 6.2.2. Los rayos X en fotomicrografía

El siguiente paso en la búsqueda de radiaciones de menor longitud de onda que permitieran una mayor resolución en las imágenes fue dado en la dirección de los rayos X. Desde su descubrimiento en 1895, los intentos por encontrar una forma de enfocar este tipo de radiación resultaron infructuosos dado la inexistencia de lentes, ópticas o electromagnéticas, capaces de llevar a un punto de foco la dispersión formada por estos rayos. El propio Röntgen intentó buscar un medio de concentrar los haces, pero fracasó<sup>102</sup>. Posteriormente, se intentó mediante el uso de espejos curvos muy pulimentados y con ángulos de incidencia próximos a un grado para lograr un mínimo de reflexión; porque de lo contrario, los haces pasarían de largo a través de la materia sin ser reflejados. En la década de los cincuenta se construyeron microscopios simples, reflectores, con uso combinado de varios espejos, que llegaron a proporcionar imágenes por rayos X con resoluciones por encima de las obtenidas con radiación UV (Figura 6.88.). Para ello, se utilizaron emulsiones de grano muy fino y radiaciones muy débiles, de longitudes de onda de dos y tres angströms, que obligaron a emplazar todo el sistema óptico en el interior de un contenedor con helio a presiones de una atmósfera. La reflexión mínima de los rayos y las distancias focales necesarias se establecieron mediante micrómetros acoplados a los espejos, hecho que posibilitó un control exhaustivo de sus inclinaciones<sup>103</sup>.

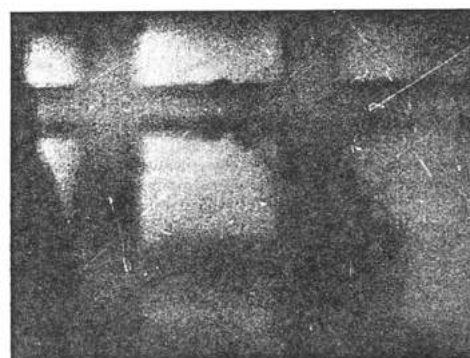


Fig. 6.88. Fotomicrografía de un detalle de una tela metálica, realizada con rayos X reflejados en espejos combinados. P. Kirkpatrick. 1950.

Sin embargo, la fórmula más buscada para conseguir una microscopía de rayos X ha sido tradicionalmente por medio del aprovechamiento de su capacidad de penetración de la materia; o lo que es lo mismo a través del estudio de la emisión y absorción en los objetos, propiedades que dependen directamente de la naturaleza de los elementos presentes en las muestras<sup>104</sup>. La manera más simple de obtener imágenes aumentadas con rayos X es poniendo el espécimen en contacto con la placa fotográfica, hacer pasar un haz a su través, y analizar los resultados con el microscopio. Esta modalidad recibe el nombre de *microrradiografía*, o *microrradiografía por contacto*. El tamaño y la definición de la imagen en este caso, se pueden variar tan sólo con acercar o alejar el espécimen de la placa fotográfica, o reduciendo el diámetro de emisión de la fuente. La resolución final viene dada por el tamaño de los granos de plata presentes en la emulsión y por el microscopio con el que son observados y ampliados. Esta técnica fue llevada a la práctica por primera vez en 1898, para el estudio de aleaciones de metales. Posteriormente, fue desarrollada en mayor profundidad en Francia durante el período entreguerras, para ser aplicada también en el campo de la metalografía. Finalmente, a partir de 1946, en Suecia, A. Engström perfeccionó el procedimiento, aplicándolo al análisis citológico. Este autor solía colocar especímenes muy delgados en contacto con placas de grano muy fino, con exposiciones de unos 20 minutos y en condiciones muy controladas, preferentemente en ambientes libres de polvo, debido a las continuas ampliaciones que era necesario realizar. Un método más rudimentario, próximo a este último, y no necesariamente vinculado a estudios microscópicos, fue el desarrollado en los años posteriores a la segunda guerra mundial para el estudio del comportamiento de los electrones en el interior de las válvulas termoiónicas del tipo magnetrón. En este caso, se utilizaron cámaras sin lentes (pinhole cameras) colocadas frente a

estos dispositivos electrónicos, y equipadas con diafragmas fijos, emplazados en láminas de plomo. De este modo, fue posible registrar una serie de patrones y figuras provenientes de los rayos X producidos por los choques de los electrones en el interior de las válvulas<sup>105</sup>.

Otra de las aplicaciones precursoras de los rayos X en el campo de la microscopía fue mediante el procedimiento de la proyección, también conocido como *microscopía de sombras por rayos X*<sup>106</sup>. En este caso, el espécimen es situado en las cercanías de la fuente emisora en vez de próximo a la placa fotográfica. Es un procedimiento que guarda gran relación con la técnica de *microscopía óptica de sombras* (Shadow photomicrography) por proporcionar imágenes silueteadas del objeto, con tamaños que varían según la mayor o menor proximidad respecto de la fuente de radiación o de la placa. En ocasiones, este tipo de técnica se ha puesto en práctica para conocer el tamaño y la altura de las diferentes partes y elementos de las muestras<sup>107</sup>, procedimiento que recuerda el seguido por Tales de Mileto para el cálculo de la altura de las pirámides. En el caso de los rayos X, los primeros intentos de producir un método de *microrradiografía por proyección* se deben a P. Czermak, tan sólo un año después del descubrimiento de este tipo de radiación. Sin embargo, fueron las lentes magnéticas las que permitieron un avance sustancial de esta técnica, al poderse concentrar haces muy finos e intensos sobre las muestras. Esto no se consiguió hasta 1939, con los trabajos de M. von Ardenne y la consolidación de la óptica electrónica. Posteriormente, en 1953, la técnica fue perfeccionada por V. E. Cosslett y W. C. Nixon, colocando muestras diminutas en el mismo orificio de salida del tubo<sup>108</sup>. La técnica por proyección ofrece una serie de ventajas respecto del método por contacto, debido a la posibilidad de estudiar seres vivos (Figura 6.89.), y muestras de mayor espesor, así como poderse realizar espectrorradiografías, utilizarse tiempos de exposición menores, y por ofrecer una resolución mejor. De hecho, esta última queda limitada exclusivamente por el diámetro del haz utilizado sobre la muestra, por su difracción en el objeto y por el grano de la emulsión fotográfica<sup>109</sup>. Esta técnica es idónea para el estudio de cualquier objeto opaco que presente irregularidades, pues son precisamente estas últimas las encargadas de producir una mayor o menor absorción de los rayos. Por lo demás, la definición de la imagen queda limitada solamente por la dimensión del foco<sup>110</sup>, mientras que con el control de la longitud de onda de los haces se obtiene un contraste más o menos acentuado y una penetración en el objeto de mayor o menor intensidad.



*Fig. 6.89.. Fotomicrografía de sombras por rayos X, de una drosophila melanogaster. 1952.*

Un procedimiento de análisis complementario, afectado por estas dos técnicas de microrradiografía por proyección y por contacto, es mediante la utilización de un espectrómetro de rayos X. Este nos proporciona el espectro de absorción de los elementos químicos presentes en la muestra. Normalmente se utiliza un microfotómetro para medir los niveles de opacidad relativa de determinadas zonas de la imagen, preferiblemente del negativo antes que de las ampliaciones. Esta tarea se ven facilitadas por la técnica de la proyección, que permite llevar a cabo mediciones de la transmisión relativa de algunos puntos del espécimen tan sólo con emplazar el espectrómetro y un contador adecuado detrás de determinadas aperturas en la imagen proyectada. Esta técnica ha sido de gran aplicación en la identificación de elementos químicos en minerales y en otros tipos de sólidos como metales o huesos y, en menor medida, en biología.



Las técnicas de microanálisis por espectrometría son complementarias del estudio de las líneas de emisión proporcionadas por el propio espécimen, una vez que es sometido al impacto de las radiaciones en el interior del tubo de rayos X. La posición de las líneas nos da a conocer los elementos presentes, mientras que sus niveles de intensidad, las concentraciones relativas. En este contexto, la instrumentación fotoeléctrica ha sido imprescindible. Mediante lentes electromagnéticas se consigue concentrar un haz de radiación muy fino sobre la muestra, y los rayos X excitados en la misma son observados mediante un microscopio. La técnica de *escaneado por punto móvil* (flying-spot scanning) (ver cap. 4.3.), en las microscopías óptica y electrónica, ha sido de gran aplicación en este tipo de operaciones, normalmente en combinación con microanalizadores y contadores electrónicos (flying spot microscopy). La emisión del rayo en cada uno de los puntos de la muestra, fruto del proceso de barrido, es detectado por un contador, cuya señal es amplificada y llevada a la pantalla de un osciloscopio. Normalmente, el análisis de cada línea espectral proporciona una imagen relativa de la distribución en el espécimen del elemento correspondiente, siendo el brillo representativo de la cantidad de elemento en ese punto de la muestra. Un perfil más detallado de esta figura se consigue mediante un barrido electrónico de cada una de las líneas, cuya salida queda representada gráficamente mediante un dispositivo impresor.

Es importante señalar respecto del papel desempeñado por los dispositivos fotoeléctricos en el campo de la microscopía, que si los procedimientos fotoquímicos, pertenecientes a las emulsiones fotográficas han sido, en líneas generales, los de mayor predilección - entre otras razones, por la especialización conseguida en la fabricación de materiales fotográficos de grano muy fino, que han hecho posible imágenes de gran resolución, definición y contraste-, la tecnología fotoeléctrica ha prestado un gran servicio en campos como la espectrometría y la microfotometría, particularmente en operaciones de enfoque de los especímenes irradiados con IR mediante tubos convertidores de imágenes; así como en el uso de pantallas fluorescentes, utilizadas en fotomicrografía de UV<sup>111</sup>, o en análisis cuantitativos llevados a cabo mediante células fotoeléctricas y fotomultiplicadores<sup>112</sup>. Todo ello, se ha visto apoyado en todo momento por sistemas informáticos de muestreo, registro y almacenamiento de datos.

### ***6.2.3. La iluminación en fotomicrografía***

Otro frente de acción de la fotomicrografía destinada a conseguir mayores niveles de resolución y contraste de sus imágenes, ha venido de la mano de las múltiples técnicas de iluminación desarrolladas principalmente a partir de los años cuarenta del pasado siglo. Aparte del método, antes comentado, de la iluminación Koehler, con luz reflejada y transmitida, que es el más común y extendido por su eficiencia y resultados, los científicos han sabido aprovechar otros fenómenos de la luz, como la polarización, la interferencia, el contraste de fase, la microestereoscopia, o la holografía, para obtener visiones de los objetos hasta entonces desconocidas. Generalmente, el método Koehler es el punto de partida para el resto de los procedimientos, que suelen añadir una u otra modificación con el fin de conseguir nuevos efectos visuales que desvelen aspectos desconocidos del objeto<sup>113</sup>. Una variedad muy utilizada es la *iluminación de fondo oscuro*, con la que se consigue representar el espécimen sobre un fondo negro homogéneo. El objetivo de esta técnica, a diferencia de la de *campo iluminado*, es hacer resaltar la muestra significativamente, aislándola del resto de elementos presentes en la imagen. El efecto se consigue situando un disco opaco en el centro del plano del diafragma anterior al portaobjeto. Esto produce la intercepción del haz de luz en su parte central, produciéndose un hueco que sólo deja pasar los rayos periféricos. De



este modo, es fácil controlar que sólo los rayos periféricos que han sido dispersados o refractados por la muestra pasen al plano de formación de la imagen, lográndose un efecto de contraste entre el objeto iluminado y un fondo oscuro y homogéneo (Figura 6.90.). Una variedad de esta técnica es la *iluminación Rheinberg*, cuyos orígenes se encuentran en los trabajos que Julius Rheinberg emprendió en 1896. En este caso, el disco central es sustituido por un filtro transparente de color, y la parte periférica por otro filtro de un color que contrasta notablemente con el anterior. Esto produce un efecto cromático de gran notoriedad con la muestra virada a un color monocromático perteneciente al filtro de contorno, y enmarcada sobre un fondo homogéneo producido por el color central. Otra modalidad de iluminación Koehler, es la *iluminación desigual*, consistente en interrumpir deliberadamente parte del cono de iluminación proveniente del condensador. Esta acción redundará en un realce del contraste de determinadas zonas de la muestra, y en un efecto de tridimensionalidad (Figura 6.91.).

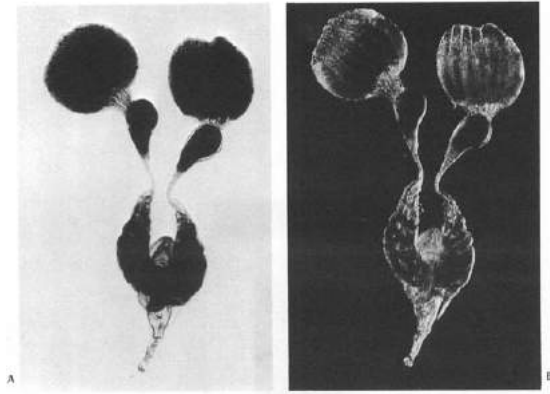


Fig. 6.90. Aparato genital masculino del insecto *Oncopeltus fasciatus*. Con técnica de iluminación de campo iluminado (izq.), y de campo oscuro (dcha). x19. 1989.

El conjunto de estas técnicas comenzó a caer en desuso a partir del descubrimiento de la técnica de iluminación por *contraste de fase*, propuesta por Frederike Zernike en 1942. Ya vimos cómo los procesos de formación de interferencias en el plano focal posterior son determinantes en la mayoría de las técnicas fotomicrográficas. Con la técnica del contraste de fase es posible convertir las diferencias de fase, relativas a los múltiples frentes de ondas de luz provenientes del objeto - por lo demás invisibles-, en diferencias de amplitudes, que sí pueden ser traducidas en resultados visibles. Para ello, es preciso alinear con precisión el anillo del condensador y el disco de retardo en el plano focal trasero con la ayuda de una lente de aumento auxiliar<sup>114</sup>. Esta acción consiste en una separación incompleta de los haces de referencia y del proveniente del objeto, hecho que redundará en unas imágenes en las que resaltan los bordes y los rasgos discontinuos de la muestra<sup>115</sup>. El hecho de que la técnica de contraste de fase obedezca en realidad a un proceso de interferencia, avivó el interés de los científicos por descubrir nuevas técnicas regidas por este mismo fenómeno, principalmente por medio de la utilización de filtros polarizadores, de interferencia, o de color, como forma de controlar los haces involucrados en la variación de las fases (Figura 6.92.). Con este tipo de experiencias se lograron resultados muy notables una vez que comenzaron a idearse nuevas formas de microscopía, y que los cambios de fase se hicieron coincidir con distintas longitudes de onda de los haces empleados, técnica que se aplicó en la producción de imágenes en color, y en franjas no visibles del espectro, como el IR y el UV. A partir de 1948, la *microscopía de interferencia múltiple* se hizo realidad, gracias a los trabajos de S. Tolansky. Los antecedentes de esta técnica se remontan a los ensayos de H. Fizeau y A. Laurent, llevados a cabo en 1862 y 1883 respectivamente<sup>116</sup>. Si el primero señaló la

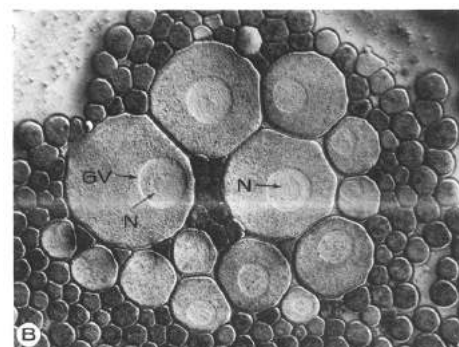


Fig. 6.91. Mancha de fluido de una lombriz *Urechis*, fotomicroografiada con técnica de iluminación desigual. 1989.

conveniencia de utilizar el fenómeno de interferencia producido por un haz doble de luz para la medición del diámetro de los astros, o para generar patrones de longitud muy precisos, el segundo sugirió por primera vez su aplicación en el estudio de superficies de metales pulimentados, al descubrir su idoneidad para detectar imperfecciones e irregularidades en este tipo de materiales. Posteriormente, en 1932, M. Siegbhan utilizó esta técnica en el estudio de las superficies diminutas de los cristales, mediante la producción de interferencias del tipo Fizeau en el microscopio. La técnica quedó completada con los trabajos de interferometría de Tolansky, antes mencionados. Básicamente, los procedimientos por interferencia consisten en escindir un haz de luz en dos o más componentes, haciendo pasar uno de ellos a través del objeto, mientras que los otros se utilizan como referencia. Al final del proceso, ambos se



**Fig. 6.93. Estudio de cristales con microscopía de interferencia, efecto Moiré. 1957.**

hacen coincidir nuevamente en el plano de formación de la imagen (Figura 6.93.). La microscopía de

interferencia de haz múltiple se caracteriza por el envío continuo de series de haces de luz donde las fases y las intensidades obedecen a progresiones muy determinadas, algo que redundaría en la producción de franjas de interferencia muy precisas. Tanto la técnica de contraste de fase como la de interferencia se aplican regularmente en metalografía, mineralogía, cristalografía, procesos industriales (metalurgia, ingeniería, física de metales), permitiendo estudios cuantitativos muy refinados y precisos de las muestras, especialmente de sus índices de refracción, determinación de espesores, análisis de revestimientos y de deposición de capas microscópicas en materiales, etc. (Figura 6.94.).

El fenómeno de la polarización de la luz se ha convertido también en una herramienta muy útil para los microscopistas. Como se sabe, la luz vibra en una serie indeterminada de planos a lo largo del eje de propagación. Los materiales anisotrópicos hacen que esta vibración rote en un sentido u otro, y que quede circunscrita a determinados planos de propagación. Cuando vibra en un sólo plano por la acción de un filtro, se dice que la luz está polarizada en ese plano. En microscopía se suele utilizar la iluminación Koehler como base, y un par de filtros que afectan el proceso de iluminación y de formación de la imagen. De este modo, se sitúa primeramente un filtro polarizador entre el condensador y el portamuestra, que es el encargado de polarizar el haz de luz entrante en un sentido determinado; y en segundo lugar, se posiciona otro filtro por encima de la lente del objetivo, o del ocular, que hace la



**Fig. 6.92. Microscopio universal útil para diversas técnicas de iluminación.**



**Fig. 6.94. Microscopio de interferencia con cámara fotográfica, para análisis metalográficos. 1957.**



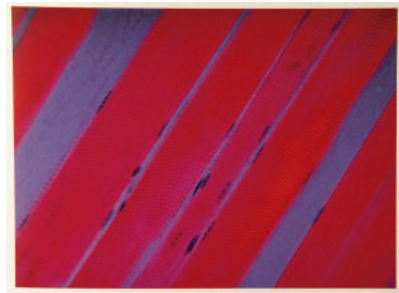


*Fig. 6.95. Fotomicroscopía por polarización, hechas con luz blanca entre nicoles cruzados. 1948.*

función de analizador<sup>117</sup>. Cuando ambos filtros están cruzados, la luz no puede pasar, de manera que sólo cuando se trata de una muestra anisotrópica, se produce una serie de efectos luminosos que son los que forman la imagen susceptible, a su vez, de ser fotografiada. Mediante la rotación de los filtros o de la propia muestra aparecen imágenes que nos dan a conocer estructuras y cualidades de los objetos imperceptibles con luz normal (Figura 6.95.).

El uso del color en la técnica de polarización se aplica a menudo al estudio de estructuras cristalinas presentes en multitud de objetos, ofreciendo resultados muy llamativos desde el punto de vista plástico y científico (Figuras 6.96. y 6.97). El color es un elemento que se emplea en microscopía cuando se quiere resaltar determinadas propiedades de los objetos, que pasarían inadvertidas de utilizarse paletas monocromáticas. Ya vimos cómo las técnicas de interferencia, de contraste de fase, o de Rheinberg, tienen la posibilidad de combinar las diferentes longitudes de onda emitidas por el objeto, o las que están presentes en las fuentes de iluminación, para producir efectos visuales de color muy notables. Los tintes fluorescentes, los filtros y algunos tipos de luz se han sumado a este tipo de técnicas para proporcionar imágenes en color que permiten la distinción y clarificación de estructuras. Por lo general, la fotomicrografía con luz visible mantiene los colores tal como los vemos, en cambio, otras, como la polarizada, o la de filtros, contrastan más los resultados<sup>118</sup>. El uso de filtros de color en fotomicrografía monocromática de blanco y negro produce resultados sobresalientes al poner en evidencia estructuras y detalles de los objetos (Figura 6.98.). Las imágenes proporcionadas por el microscopio electrónico, la resonancia magnética, o la ecografía por ultrasonido son monocromáticas, debido a que no utilizan luz visible para iluminar los objetos, lo que no quita para que a menudo se presenten sus resultados coloreados. La endoscopia, por el contrario sí conserva los colores.

Decir respecto de esta última técnica que, aún no siendo estrictamente parte de la fotomicrografía, se ha convertido en una de las herramientas fundamentales para el estudio y observación de estructuras ocultas a la visión humana. El desarrollo

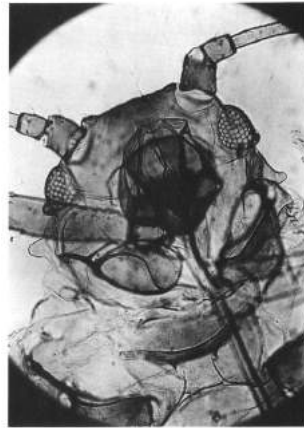


*Fig. 6.96. Fotomicrografía con luz polarizada de un músculo. Aumento 130x. Michael Abbey. c.a. 1990.*

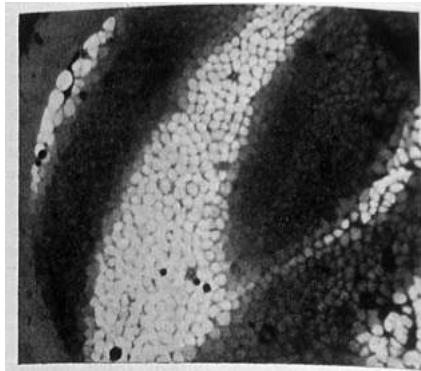


*Fig. 6.97. Fotomicrografía con luz polarizada. Tejido óseo. Aumento de 110x, Pittro Motta. c.a. 1990.*

de la fibra óptica y de la tecnología electrónica en su conjunto ha sido decisivo para impulsar este tipo de técnica en el ámbito de la producción de imágenes. Como vimos en capítulos anteriores (Cap. 2.2.4.), los primeros intentos por desarrollar este tipo de dispositivos se produjeron en la segunda mitad del siglo XIX mediante una instrumentación muy rudimentaria, que en ocasiones era acoplada a cámaras fotográficas convencionales. Con el tiempo, fue necesario desarrollar equipos fotográficos especializados y poner en práctica dispositivos fotoeléctricos de gran sensibilidad, sistemas de iluminación



**Fig. 6.98.**  
*Foto-  
micrografía  
de un pulgón,  
con filtro azul  
emplazado en  
un  
microscopio  
compuesto.  
x100.*

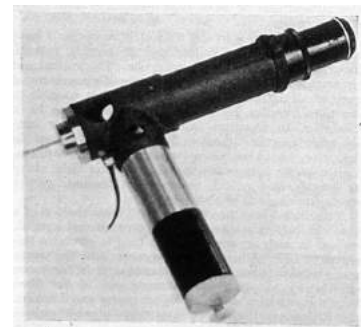


**Fig. 6.99.** *Vista microscópica de la  
arteria de una rana con un  
dispositivo de fibra óptica. 1961.*

estroboscópicos para imagen en movimiento, flashes electrónicos, y sistemas estereoscópicos que permitieran su acoplamiento a las nuevas fórmulas endoscópicas. En este contexto, fue desarrollada en 1950 la cámara endoscópica Intraflex, con uso de espejos que permitían que parte del haz de luz iluminara el objeto, dejando la otra parte del conducto para el haz reflejado en su camino de vuelta. La escasa luminosidad de las escenas captadas recomendaron el uso de sistemas de vídeo y de fotomultiplicadores por encima de los fotográficos convencionales, práctica que ha continuado hasta nuestros días, impulsado por el desarrollo de la fibra óptica y del tratamiento digital de las señales<sup>119</sup>. (Figuras 6.99.; y 6.100).

#### **6.2.4. La fotoelectricidad en microscopía**

El perfeccionamiento de las técnicas de vídeo y de televisión a partir del desarrollo de los tubos de imagen (vidicom, orthicom, o emitron) y de la posibilidad de poder almacenar la información en cintas magnéticas y otros soportes de memoria asociados a los ordenadores, abrió un nuevo campo de aplicación en microscopía y en técnicas próximas a ésta como la endoscopia o el escáner. Estas experiencias supusieron con el tiempo el camino directo hacia la actual fotomicrografía digital y otras técnicas de exploración del interior de objetos y organismos vivos. Tanto el microscopio como el endoscopio se beneficiaron sustancialmente de las capacidades inherentes a este tipo de técnicas, tales como su efecto multiplicador e integrador, analítico, comparativo, de transporte, y almacenamiento, tal como salió a relucir en el capítulo dedicado al iconoscopio y la televisión (ver Cap. 4.3). Las posibilidades de estudiar los objetos en vivo y a distancia, en un amplio espectro de radiaciones (rayos X, UV, visible, IR), o de acumular o multiplicar el efecto de la luz en condiciones de intensidades mínimas, fueron las principales ventajas que este tipo de tecnología aportó a la microscopía<sup>120</sup>. Por el contrario, su gran limitación recayó tradicionalmente en la escasa



**Fig. 6.100.** *Prototipo de  
hipodérmica con fibra óptica.  
1961.*



calidad de sus imágenes, especialmente cuando era comparada con la de sales de plata; más si cabe, cuando es ésta una cualidad muy estimada en el campo de la fotomicrografía. De hecho, esta demanda no ha sido plenamente satisfecha hasta muy recientemente gracias al perfeccionamiento de los sensores de estado sólido. Esta es una de las razones por las que las técnicas fotoeléctricas aplicadas al campo de la microscopía y de la observación de la estructura interna de la materia y de los seres vivos hayan tenido una mayor aplicabilidad durante la segunda mitad del pasado siglo en dispositivos de escaneado y de fotomicrografía en franjas del espectro como el UV. La técnica de *escaneado por punto móvil* (flying spot scanning) (ver cap. 4.3.) supuso el punto de partida para el desarrollo de nuevas técnicas de observación con gran repercusión en el campo de la industria, de la biología, o del diagnóstico clínico por imagen.

En esta época de transición, no fue extraño encontrar casos de aplicación conjunta de las técnicas fotográficas y fotoeléctricas. Así por ejemplo, los escáneres de punto móvil fueron acoplados en numerosas ocasiones a microscopios de interferencia, dando lugar a imágenes de televisión registradas alternativamente en película cinematográfica de 16 mm<sup>121</sup>; o en soportes magnéticos. Estas últimas se vieron favorecidas por la entrada en escena de los nuevos tubos vidicom, especialmente en el ámbito de la microscopía UV y de rayos X<sup>122</sup>, con resultados muy similares a los conseguidos con fotografía de 35 mm tomada directamente de los monitores<sup>123</sup>. Por su parte, a partir de los sesenta las técnicas de escáner han tenido mayor aceptación en el campo del diagnóstico clínico por imagen, especialmente con el uso de contrastes suministrados normalmente por vía intravenosa. La urografía, la arteriografía, la pielografía, o la serialografía, por medio de rayos X, o con el uso de contrastes por isótopos radiactivos, son ejemplos de una práctica que perdura hasta nuestros días con notable éxito (Figuras 6.101; y 6.102).

Desde sus orígenes, la tecnología fotoeléctrica tuvo una aceptación mayor en áreas como la microespectrometría, la microdensitometría, o la microfotometría, áreas donde los análisis pormenorizados de las líneas espectrales, de los puntos

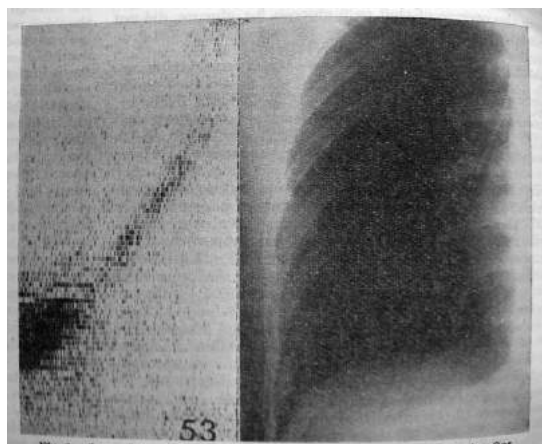


Fig. 6.102. Escáner de la distribución de albúmina en un pulmón. 1965.

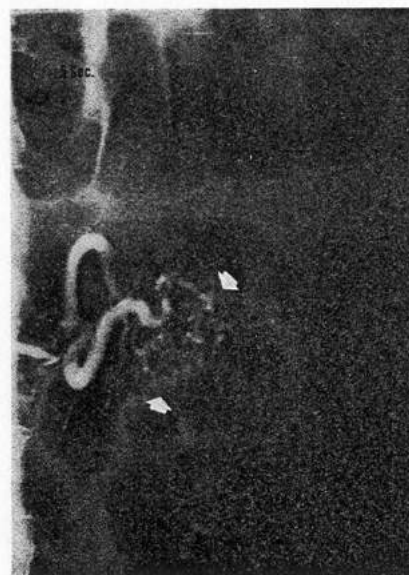
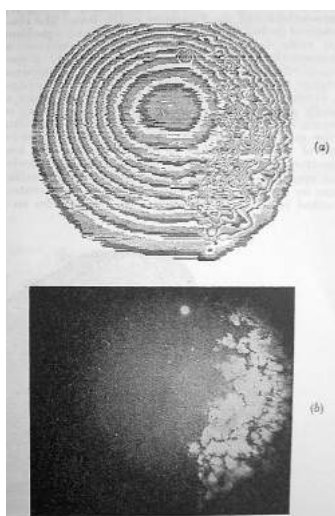


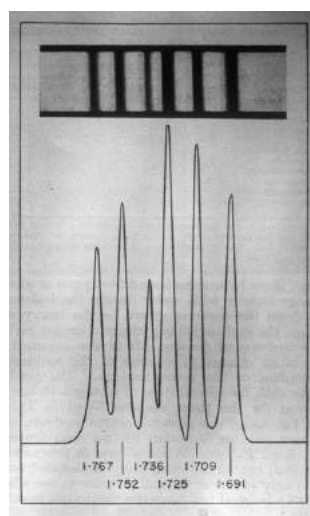
Fig. 6.101. Arteriografía renal con uso de contrastes y película de rayos X. 1964.

de opacidad de las emulsiones, o de los niveles de luminosidad de los objetos, pueden ser realizados en mayor detalle con la ayuda de células fotoeléctricas, osciloscopios, integradores electrónicos y dispositivos electrofotográficos para la impresión gráfica de los resultados. De hecho, esta ha sido la tendencia general impuesta en numerosas técnicas de observación y representación de fenómenos donde los científicos han preferido la representación gráfica, mediante histogramas, ejes de coordenadas o curvas, por encima incluso de la imagen real de los fenómenos. La cuantificación y el almacenamiento de los datos, donde los ordenadores han

desempeñado un papel de primer orden, ha sido una de los motivos principales de esta predilección. Hay que tener en cuenta que la cuantificación y medición de las características más sobresalientes presentes en las emulsiones ( distancias, ángulos, puntos, curvas, volúmenes, figuras, etc.) tenían que ser llevadas a cabo hasta entonces mediante técnicas estrictamente manuales, con la ayuda de micrómetros, calibradores de Vernier, escalas, medidores topográficos, planímetros, reglas, contadores, octantes, o técnicas de muestreo, lo que dilataba y entorpecía considerablemente las operaciones. De aquí, que la tecnología fotoeléctrica supusiera un gran avance en la cuantificación de este tipo de variables topográficas y geométricas, y en la determinación de valores ópticos, como la densitometría, absorción, birrefringencia, índice de refracción, o fluorescencia<sup>124</sup>. (Figuras 6.103; y 6.104).



**Fig. 6.103.**  
*Microdensitometría  
realizada de una  
fotografía  
estereoscópica de un  
eclipse solar. 1964.*



**Fig. 6.104.**  
*Espectrografía  
de absorción  
en el UV, y  
diagrama de  
desintometría  
del ADN. 1961.*

### 6.2.5. El ultrasonido

Más allá del espectro electromagnético encontramos técnicas de observación muy próximas a las microscópicas, que ha adquirido un gran protagonismo en nuestros días. Una de ellas es el ultrasonido. El ultrasonido se debe a ondas vibratorias de la misma naturaleza que el sonido, pero de frecuencias situadas por encima de los 20 kilohertzios, límite superior de percepción del oído humano. Sus longitudes de onda tan cortas hacen que su forma de propagación sea muy similar a la luz, asemejándose sus principios a los de la óptica geométrica. El ultrasonido se propaga, por consiguiente, de forma rectilínea y comporta patrones de sombra reconocibles y susceptibles de ser registrados fotográficamente o con dispositivos fotoeléctricos. La detección y generación de este tipo de ondas de alta frecuencia puede hacerse mediante cristales piezoeléctricos, una práctica ideada por Paul Langevin a principios del siglo pasado; o por medio de técnicas más novedosas, como la *magnetostricción*. Si en los primeros se utilizan láminas de cristales de cuarzo que se hacen vibrar a la frecuencia de su resonancia, en los segundos son barras de níquel rodeadas de una bobina de un material conductor en la que se hace circular una corriente de alta frecuencia, y coincidente con la frecuencia de resonancia de la barra. Las aplicaciones del ultrasonido son muy diversas. En el campo de la producción de imágenes ha dado lugar a la *ultramicroscopía* o *microscopía acústica* (Figura 6.105), técnicas de sondeo submarino como el sónar, de detección de obstáculos e imperfecciones en materiales, de estudio de fenómenos atmosféricos, de producción de imágenes Chladni, y a diferentes técnicas de escaneado, entre las que se encuentra la actual *ecografía*. Estas

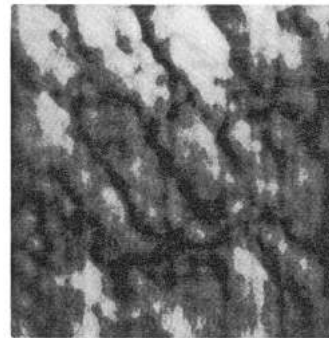


*Fig. 6.105. Membrana de una célula de levadura vista a través de un desintegrador de ultrasonido. 1959.*

formas de representación directa de las vibraciones se han visto coronadas con la posibilidad de convertir en resultados visuales las señales de alta frecuencia captadas con osciloscopios, lo que ha posibilitado el estudio de multitud de fenómenos físicos y biológicos.

La microscopía acústica como tal, nació a finales de los cincuenta del siglo pasado, una vez que las técnicas fotoeléctricas de barrido y el láser comenzaron a aplicarse en la producción de imágenes relativas a señales sonoras de alta frecuencia. La receta básica utilizada en estos primeros años de cara a obtener imágenes a partir de señales acústicas fue la emisión de un haz láser en conjunción con una onda sonora, modificada espacialmente por

el objeto de estudio<sup>125</sup>. En el caso concreto de la microscopía, la tecnología de ultrasonido proporciona longitudes de onda lo suficientemente altas como para brindar niveles de resolución comparables a los medios ópticos<sup>126</sup>. Las primeras experiencias consistieron en situar la muestra en un medio líquido y someterla a unas frecuencias determinadas. Los efectos de esta propagación eran recogidos por espejos de plástico moldeables, que conformaban un patrón ondulado en su superficie. Esta deformación era detectada por un láser que iba barriendo su superficie a la vez que emitía señales susceptibles de ser registradas por un fotodiodo. Estas señales, una vez amplificadas, eran enviadas a un monitor de TV donde se reproducía el patrón originario (Figura 6.106). Para principios de los setenta, esta misma técnica se perfeccionó hasta hacer posible la presentación de imágenes acústicas y ópticas de los fenómenos de forma instantánea y conjunta<sup>127</sup> (Figura 6.107).



*Fig. 6.106. Fotomicrografía acústica de la piel de una cebolla, tenida por sus autores como la primera en su especie. 1971.*

Una vez contemplado el amplio abanico de posibilidades que presenta la fotomicrografía, es preciso señalar escuetamente dos capacidades adicionales que vienen dadas por la estereografía y por la observación de fenómenos diminutos en movimiento.



*Fig. 6.107. Fotomicrografías ópticas (arriba) y acústicas (abajo), de una larva de mosca (*Drosophila melanogaster*), con técnica de barrido por láser, y vistas en un monitor de TV 1972.*

Si éste último aspecto será atendido en un capítulo posterior, dedicado específicamente a la imagen en movimiento (ver cap. 6.3.3), decir sobre el primero que la visión estereoscópica es una herramienta muy frecuente en el campo de la microscopía y de la fotomicrografía, especialmente en la de baja capacidad de aumento, que es la que permite mayor profundidad de campo en las imágenes. En microscopía, esta técnica es fundamental para la manipulación de determinadas muestras, para labores de disección, y para asegurar que la orientación de la imagen se corresponda con la de la muestra. En fotomicrografía se emplea la técnica estereoscópica cuando las muestras son prolijas en planos difícilmente reproducibles por



medios convencionales. Se pueden obtener imágenes de este tipo con microscopios monoculares y binoculares, siendo la iluminación reflejada la más aconsejable. En este contexto, es preciso recordar la holografía, técnica que fue propuesta en sus orígenes para mejorar la resolución de la microscopía electrónica, y que ha proporcionado experiencias muy interesantes al respecto (ver Cap. 5.5.4.). La aplicación de la técnica holográfica en el campo de la microscopía fue perseguida con ahínco durante la década de los sesenta, proponiéndose varios microscopios holográficos. Sin embargo, la aparición de manchas y de ruido de intermodulación en las imágenes, supuso una seria limitación al respecto, razón por la que la investigación continúa en esta dirección.

#### ***6.2.6. La microscopía electrónica en el estudio de la fotografía***

Dentro de este capítulo dedicado a la exploración del universo diminuto, mención aparte merece la microscopía electrónica, como complemento a la atención recibida en un capítulo anterior (ver cap. 4.3.2.). Recordando algunos aspectos esenciales de la fotomicrografía electrónica, decir que su campo de actuación comienza a partir de los 1.200 aumentos, teniendo en la actualidad su límite superior alrededor del millón con niveles de resolución muy por encima de su homóloga óptica. La utilización de haces de electrones en vez de luz, y el empleo de una óptica electrónica basada en campos magnéticos y eléctricos situados en el paso de este haz, son los elementos esenciales para conseguir estos niveles de acercamiento a los objetos. Es preciso señalar que estas dos microscopías cumplen objetivos diferentes, dado que los rasgos que salen a relucir en la óptica, fundamentalmente por las propiedades de absorción de la luz en la muestra, son distintos de los que se consiguen con la dispersión de los electrones, propia del microscopio electrónico.

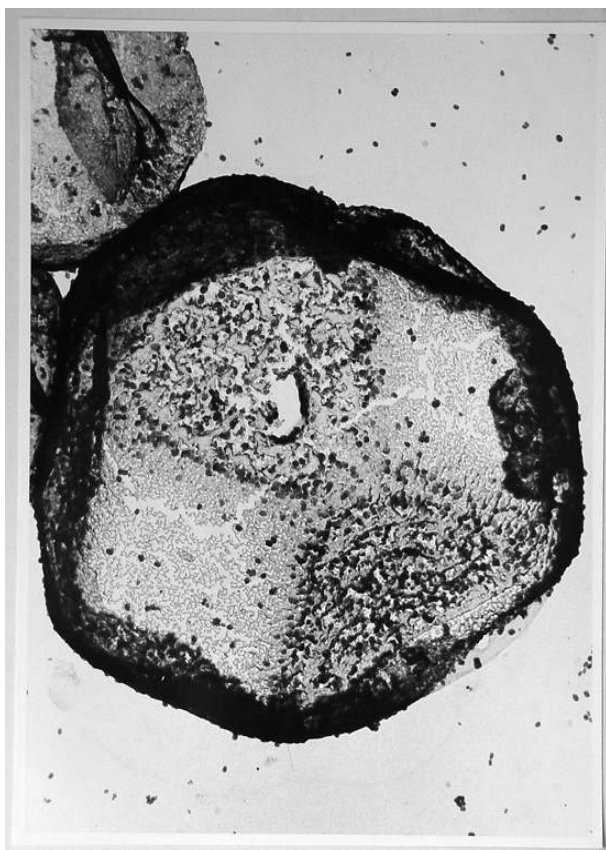
Desde su creación, la microscopía electrónica fue aprovechada por los científicos, en sus dos modalidades de transmisión y barrido, para el estudio de las emulsiones fotográficas, aportando datos muy reveladores para la comprensión de los procesos de revelado y de formación de la imagen latente. Para el estudio de las emulsiones ha sido la técnica de barrido (SEM) la más utilizada, por proporcionar imágenes más cercanas a un efecto tridimensional, un tipo de visión óptimo para la observación de los rasgos en relieve e irregulares de este tipo de materiales. Mientras que la producción de la imagen en el modelo de transmisión (TEM) es instantánea, en el de barrido está marcada por el ritmo de lectura que el haz de electrones impone sobre la muestra. T. L. Hayes señala al respecto<sup>128</sup> que esta diferencia marca un límite entre la microscopía óptica y la TEM por un lado, y la SEM por otro; porque, mientras que la resolución de la imagen y la información que proveen las primeras están íntimamente ligadas, la técnica de barrido localiza los puntos en el tiempo y no en el espacio, lo que permite separar la localización de la radiación por un lado y su respectiva señal. Esta lectura, a modo de escáner, permite por tanto una separación espacio- temporal que redundará en imágenes de una mayor profundidad de foco y en un efecto de mayor tridimensionalidad. Por su parte, la TEM es más aconsejable para la observación de procesos rápidos y para el estudio de muestras muy delgadas y transparentes. En este caso, los electrones dispersados por la muestra son llevados a foco en el plano de formación de la imagen, donde es colocada una pantalla o una película fotográfica. El material fotográfico más idóneo para la TEM son las películas y placas de grano fino de gran eficiencia cuántica. Por el contrario, la SEM utiliza material fotográfico específico para el registro de imágenes producidas por pantallas fosforescentes del tipo CRT (Tubo de rayos catódicos).



Es preciso destacar que en el conjunto de las microscopías, tan importantes son las técnicas de iluminación, las radiaciones y la óptica empleadas, como las tareas de preparación de las muestras. En este sentido, resalta la *técnica de la replicación* o de *microrréplicas*, ampliamente utilizada en ciencia y, en particular, en el estudio de las emulsiones fotográficas. La técnica de microrréplicas aparece en la escena de los laboratorios científicos a principios de la segunda guerra mundial. Su utilización en microscopía se recomienda para la observación de superficies difíciles de acomodar bajo el microscopio, debido a su tamaño, rugosidad o forma, o porque el haz de electrones afecta el comportamiento y características de las muestras, como es el caso de las sales de plata. En el estudio de las emulsiones fotográficas por este procedimiento, es ejemplar el trabajo de J. A. Aznárez, científico del CSIC, que ha dedicado gran parte de su carrera de investigador al estudio de los centros de sensibilidad presentes en este tipo de materiales. Su campo de investigación se ha centrado en la aplicación de la microscopía electrónica al estudio de las emulsiones fotográficas, tarea que desarrolló en el período comprendido entre finales de los sesenta y 1986, fecha que coincide con la celebración del Congreso Internacional de Fotografía, dedicado ese año a la figura de Jordan Malinowski, uno de los investigadores más sobresalientes en el campo de la fotografía.

Dentro del proceso fotográfico, que va desde la fabricación de emulsiones hasta los procesos de revelado y fijado de la imagen, la labor de Aznárez se centró en el estudio microscópico de la formación de los centros de sensibilidad y de imagen latente en los micro- cristales de bromuro de plata. El objetivo de esta investigación fue el estudio y observación de las transformaciones físico- químicas que se producen a una escala de agrupaciones de varios átomos. Debido a que el microscopio electrónico presenta serias dificultades para poder discernir más allá de agrupaciones de cuatro o cinco átomos de bromuro de plata, se recurrió a la multiplicación o potenciación de la reacción de los productos fotográficos con el fin de provocar el crecimiento de estos centros de sensibilidad hasta límites observables. Hay que tener presente que el proceso de fabricación y de sensibilización de las emulsiones fotográficas es altamente complejo. Un dato revelador al respecto es que si se utilizaran cristales de bromuro de plata puros y sin defectos, la acción de la luz sobre ellos pasaría desapercibida, pues la escisión primaria que se produce en estos cristales por la acción de la luz, y que da lugar a la formación de un electrón y un hueco positivo, volvería a su estado inicial de forma inmediata, sin producir efecto observable alguno. En otras palabras, el electrón y el hueco positivo se recombinarían de nuevo, una vez pasada la acción del fotón, restituyéndose la formación original, sin producirse la imagen. Es por lo que en el proceso de fabricación de productos fotográficos se añade una serie de compuestos químicos, que dan lugar a centros de sensibilización que impiden esta restitución o vuelta al estado original.

La investigación de estos centros de sensibilización por este científico ha consistido, por tanto, en aumentar su acción con la finalidad de poderse observar la respuesta de los cristales con ayuda del microscopio electrónico<sup>129</sup>. Para el estudio de los centros de sensibilización correspondientes a la imagen latente, la sobreactuación se logró aumentando las unidades de exposición hasta niveles de solarización, de acuerdo con el patrón marcado por la *curva característica sensitométrica*. Los límites de observación de este tipo de fenómenos mediante el microscopio electrónico rondan entre los 15 y 50 Å. Esta limitación viene dada fundamentalmente por el propio haz de electrones utilizado en hacer visible este tipo de fenómenos, ya que puede afectar al grano de bromuro de plata. La solución fue poner en práctica la técnica de microrréplica, concretamente la de *réplica de extracción*. Esta consiste en recubrir los granos de plata con una película muy fina de un material plástico, lográndose un efecto de máscara, que recuerda las utilizadas para la fabricación de bustos necrológicos. Una vez depositada sobre los



*Fig. 6.108. Fotomicrografía electrónica con técnica de réplica, de granos sin exponer de la película Radioval, sobre los que se ha precipitado sulfuro de plata. Aznárez, CSIC. h. 1972.*

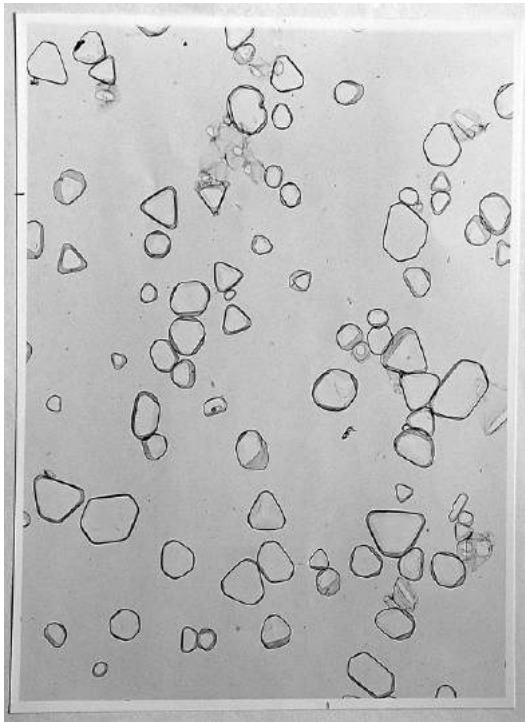
granos, éstos son vaciados, dando lugar a un molde que se convierte en una huella fidedigna de la forma del grano. A partir de aquí, con la intervención del microscopio electrónico se puede crear una imagen fotográfica que nos permite el estudio de estos microcristales (Figuras 6.108; 6.109; y 6.110).

Como puede observarse, esta técnica está dirigida al estudio en detalle de las emulsiones y no al conjunto del procedimiento o al comportamiento general de las mismas. El resultado de estas investigaciones se plasmó en la detección de una serie de *puntos oscuros* (specks) dentro de los cristales que una vez analizados mediante la difracción de electrones (diagramas de difracción) se pudo comprobar que eran de sulfuro de plata (Figura 6.111). Posteriormente, en un tercer período de la investigación, se llevó a cabo un análisis pormenorizado de estos centros mediante la técnica de evaporación en alto vacío y depositando el bromuro de plata en láminas muy finas sobre superficies metálicas (Figura 6.112.).

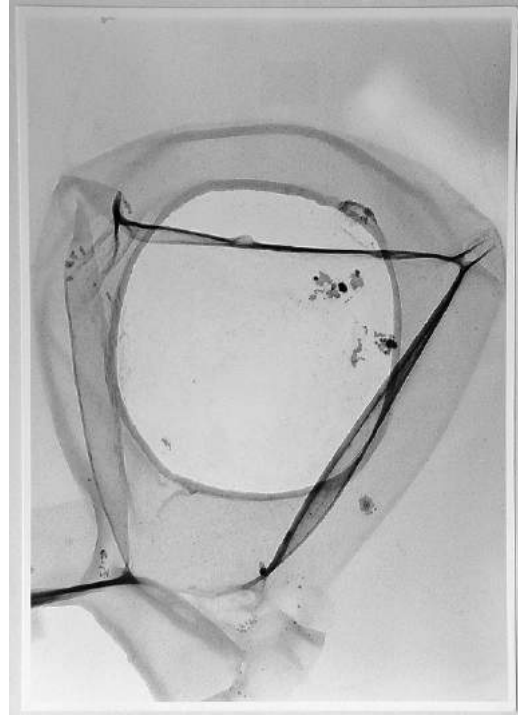
El estudio del comportamiento de las sales de plata de las emulsiones fotográficas ha sido muy prolijo a lo largo del pasado siglo. Las técnicas han sido muy variadas, aprovechándose para su estudio todo tipo de radiaciones, incluidas las radiactivas (Figura 6.113), así como múltiples procedimientos que pudieran aportar resultados observables. Ni que decir tiene que todo este esfuerzo ha redundado en la fabricación de productos cada vez más especializados y en una experiencia fundamental para el desarrollo del conjunto de la ciencia. Otra de las áreas donde la fotografía, en alianza con la microscopía, ha reportado mayores éxitos para el avance científico, ha sido en la física nuclear, particularmente con la utilización de aquellas emulsiones fotográficas conocidas como *emulsiones nucleares*.

### **6.2.7. La fotografía nuclear**

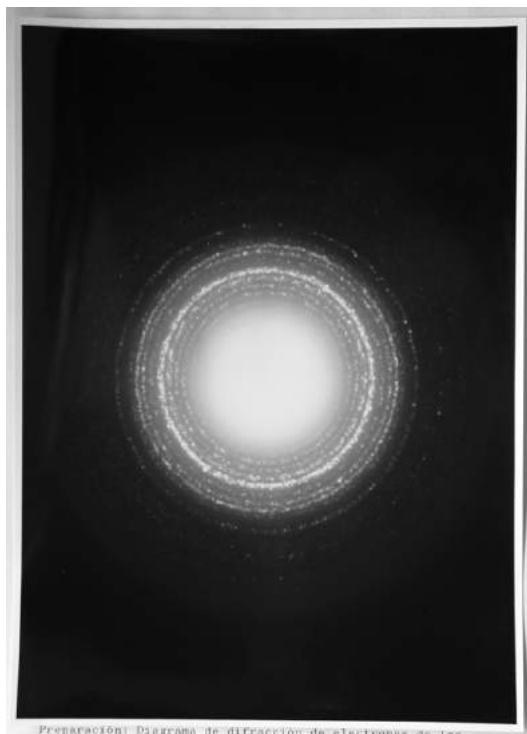
Desde el descubrimiento de la radioactividad por H. Becquerel en 1896 por medio de la fotografía, las placas se convirtieron, junto con los contadores de partículas, los centelleadores y los electros copios, en el principal instrumento para el estudio de este tipo de radiaciones. Entre las primeras experiencias en este sentido debemos recordar a Paul Villard, que detectó en 1900, también por un método fotográfico, la radiación gamma (ver Cap. 4.3.3.). Posteriormente, en 1910, S. Kinoshita, colaborador de Rutherford, demostró que los granos de las sales de plata se veían afectados notablemente por las partículas alfa radiactivas, y que el



**Fig. 6.109. Fotomicrografía electrónica con técnica de réplica de granos sin exponer de la película aérea Kodak Plus X. Aumentos placa: 4.000x Aumentos fotografía: 18.000x. 1973. Aznárez. CSIC.**



**Fig. 6.110. Fotomicrografía electrónica con técnica de réplica, de granos de la película Radioval expuestos en la zona de solarización. 1/4 seg. Aumento placa: 30.000x. Aumento fotografía: 115.000. 1972. Aznárez. CSIC.**



**Fig. 6.111. Diagrama de difracción de electrones de los "specks" de sulfuro de plata formados en una capa de AgBr. Aznárez. CSIC. h. 1973.**



**Fig. 6.112. Fotomicrografía electrónica con técnica de réplica de una capa de AgBr evaporada en alto vacío. Aznárez. CSIC. h. 1973.**



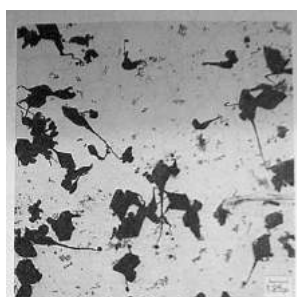
impacto de una sola de ellas era capaz de producir el fenómeno de la imagen latente en las emulsiones<sup>130</sup>. La aparición en 1911 de la cámara de niebla de Wilson supuso un salto cualitativo muy importante en el curso de estas investigaciones, dado que era la primera vez que se conseguía observar, también mediante la fotografía, el trazado de este tipo de partículas. En 1912, M. Reinganum observó el trazo de partículas alfa como una sucesión continuada de granos ennegrecidos, en una emulsión que fue expuesta, esta vez, de forma directa.

*Por analogía con la acción de la luz sobre los granos fotográficos, parece casi seguro que la acción de las partículas cargadas produce una imagen latente en el grano fotográfico como resultado de la producción de electrones libres conductores, tal como ocurre cuando son expuestos a la luz*.<sup>131</sup>

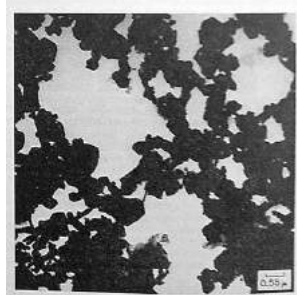
#### 6.2.7.1. Marietta Blau, una pionera

Estos hechos abrieron el camino a una serie de investigadores, responsables directos de la creación del método de las emulsiones nucleares aplicado a la física nuclear, donde destacan, entre otros, las figuras de Marietta Blau y Pierre Demers. El trabajo de Blau, realizado de forma artesanal y en unas condiciones repletas de dificultades en el ámbito profesional y personal<sup>132</sup>, fue decisivo en la obra posterior de autores claves en el desarrollo de esta técnica, como H. Wambacher, colaborador de Blau durante muchos años, C. F. Powell, ganador del premio Nóbel por los trabajos realizados en el campo de las emulsiones nucleares, G. P. S. Occhialini, junto con Powell, máximo representante de la Escuela de Bristol; y E. Gardner, asociado al laboratorio Lawrence de Berkeley. Estos dos centros situados a un lado y otro del Atlántico conformaron dos paradigmas de hacer ciencia muy definitorios del momento histórico por el que atravesaba la investigación en el mundo. Mientras que en Europa el trabajo con las emulsiones nucleares se llevaba a cabo con escasos medios, situación favorecida por un método como el fotográfico que no precisaba de grandes inversiones, y en el ámbito preferente de las radiaciones cósmicas; en California, comenzaba a aflorar un nuevo modelo de actuación, caracterizado por contar con amplios recursos técnicos, léase los

nuevos aceleradores de partículas - en esta ocasión, aplicados al método de las emulsiones nucleares- o posteriormente las cámaras de burbujas, todo ello en consonancia con el fuerte despegue económico experimentado por Estados Unidos tras la guerra.



**Fig. 6.113.**  
*Sales de plata  
expuestas a  
radiación y  
observadas  
con el  
microscopio  
electrónico.  
1964.*



El desarrollo de la técnica de emulsiones nucleares por Blau desde principios de los años veinte creció a la par que el de la cámara de niebla. Ya salió a relucir en capítulos anteriores (ver Cap. 6.2.7.1.) el gran papel desempeñado por esta última en el descubrimiento de numerosas partículas subatómicas ( $e^-$ ,  $\mu^+$ ,  $\mu^-$ ,  $K^0$ ,  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^-$ , y  $\Xi^-$ ). Sin embargo, el esfuerzo personal de esta científico, que tuvo que trabajar en un continuo peregrinaje por laboratorios de medio mundo, situó en pocos años el método de las emulsiones en un status equiparable al de la cámara de niebla. Si bien, esta última permitiría distinguir de forma



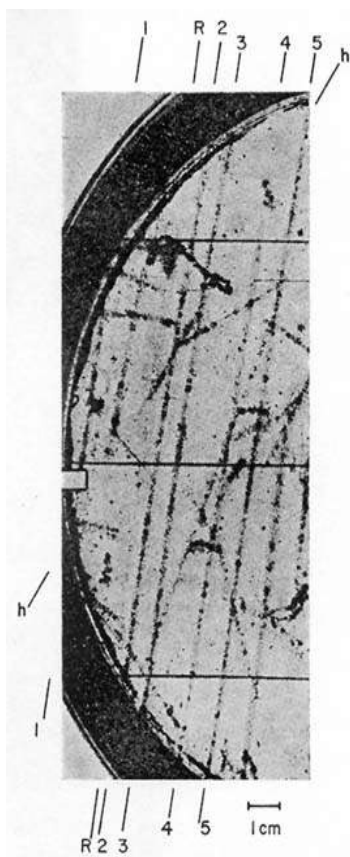
precisa los trazos de las partículas o emplazar campos magnéticos y eléctricos a su paso<sup>133</sup>, las emulsiones contaban con la ventaja de poder detener las radiaciones, disponer de una sensibilidad continuada, o mayor simplicidad de uso, rasgos que la convirtieron durante tres décadas en una de las instrumentaciones más significativas en el estudio del universo atómico y de la radiación cósmica<sup>134</sup>.

*Quisiéramos llamar la atención sobre el ahorro de trabajo tan grande que permite el método fotográfico. 20.000 pares de fotografías estereoscópicas fueron tomadas con el método de la cámara de expansión para analizar las energías de los neutrones en la reacción  $\text{Li} + \text{D}$ , entre las cuales fueron seleccionados 1.600 trazos para hacer mediciones. Del mismo modo, hemos medido la distribución de energía de estos neutrones por el método fotográfico; los 3.000 trazados necesarios para el análisis están todos contenidos en tres centímetros cuadrados de una placa de medios-tonos Ilford, obtenida con una exposición de unos pocos minutos.*<sup>135</sup>

#### **6.2.7.2. Fotografía nuclear versus cámara de niebla**

Si la cámara de niebla sufrió un proceso de adecuación, previo a ser aceptada como un instrumento más dentro del campo de la física atómica, y a su correspondiente lanzamiento en el mercado de los laboratorios, la técnica de las emulsiones nucleares pasó también por un período de pruebas, caracterizado por la utilización en un principio de placas convencionales y fabricadas por los mismos investigadores, sin llegar a consolidarse como herramienta científica hasta que la industria fotográfica del momento decidió comercializar una amplia variedad de emulsiones especializadas en estos fines. Tanto las emulsiones nucleares como las distintas cámaras coinciden en hacer visible los trazos de iones generados por las partículas cargadas. En el caso de la cámara de niebla de Wilson, son las gotas de vapor supersaturado presentes en la cámara las que se adhieren a estos iones haciéndolos visibles y permitiendo que sean fotografiados<sup>136</sup>. Las emulsiones, por el contrario, lo hacen de forma directa, por medio de exposiciones y revelados adecuados: *cambiando las gotas de agua por plata precipitada*<sup>137</sup>. En este caso, la huella dejada por las partículas sobre los granos de sales de plata es tan diminuta que se necesita un microscopio para su observación y ser fotografiadas. Tanto la cámara de niebla como la de burbujas utilizan normalmente campos magnéticos y eléctricos para el control de los haces de partículas, y conforman, por lo general, el dispositivo de salida de los aceleradores de partículas, encargándose de la detección y registro de las mismas.

El período de esplendor de las emulsiones nucleares, coincidente con el descubrimiento de seis partículas subatómicas ( $\pi^+$ ,  $\pi^-$ ,  $\Lambda^0$ ,  $\Sigma^+$ ,  $K^+$  y  $K^-$ ), se inició en los años previos a la segunda guerra mundial, y se prolongó hasta principios de los sesenta, fechas de su entrada en declive, debido al fuerte desarrollo de los aceleradores de partículas y de la cámara de burbujas. El comportamiento variable en el tiempo de los neutrones, y la complejidad de los compuestos químicos, ambos presentes en las emulsiones, fueron razones de peso para desaconsejar su uso. En este sentido, la cámara de burbujas supuso un gran avance respecto de las emulsiones nucleares y la cámara de niebla al lograr una adaptación óptima a los nuevos aceleradores<sup>138</sup>. No obstante, las emulsiones nucleares fueron una herramienta aplicada a las propias cámaras de burbujas y los aceleradores, y



**Fig. 6.114.**  
*Fotografía supuestamente de un quark, realizada por C. B. A. McCusker con una cámara de niebla. 1969.*

ampliamente utilizada por los laboratorios hasta bien entrada la década de los sesenta para el estudio de partículas de vida extremadamente corta, y para los procesos de fisión de distintos elementos. En esta área de exploración, destaca la figura de Catalá de Alemany, uno de los científicos españoles más involucrados en el estudio del universo subatómico mediante el procedimiento fotográfico en los centros de Bristol y de la Universidad Politécnica de Valencia.

Desde el aislamiento del electrón y del descubrimiento de las primeras emanaciones radioactivas, los científicos no han escatimado esfuerzos a la hora de aislar nuevas partículas. Hoy día se puede contar una veintena larga de ellas, convenientemente identificadas y en la mayoría de los casos visualizada. Entre las últimas en ser registradas por procedimientos fotográficos, tenemos los *quarks*, cuya existencia fue postulada teóricamente en 1962 por Murray Gellman (Figura 6.114.). La dinámica establecida a lo largo de la historia de este tipo de descubrimientos ha consistido en un ir y

venir constante de la experimentación a la teoría, o de la hipótesis a la visualización concreta y objetiva de los hechos.

### **6.2.7.3. El mundo sub-atómico a los ojos de la fotografía**

Para comprender cómo interaccionan las partículas con las emulsiones fotográficas es preciso conocer su comportamiento general frente a la materia. Las partículas atómicas, desde el electrón al protón, o del mesón  $\pi$  al neutrino, son por lo general muy pequeñas si las comparamos con el diámetro total del átomo. Esta es la razón por la que pueden atravesar sin dificultad la materia con la que establecen una interacción regulada por sus velocidades y sus cargas electrostáticas. Mientras más veloces se comportan (pueden adquirir velocidades comprendidas entre 0 y la velocidad de la luz) menos interacción tienen con la materia, y viceversa. Por el contrario, su interacción con la materia es proporcional a su carga. El comportamiento más sobresaliente respecto del medio que atraviesan es la ionización, fenómeno que depende tanto de la velocidad y la carga de la partícula, como de las características del medio que atraviesan. La intensidad de esta ionización viene dada por el nivel de pérdida de energía que experimenta cada una de ellas. La energía de las partículas se disipa con esta ionización y por la emisión de fotones, como se comprueba en las pantallas de los centelleadores y en algunos tipos de radiaciones. Las partículas, al atravesar un medio en concreto, suelen experimentar una serie de desviaciones y comportamientos que son bien conocidos por los fotógrafos nucleares. Dependiendo de su cantidad de movimiento y de las características del campo electrostático del medio sufren una serie de desviaciones, donde cabe destacar la *dispersión* (scattering)<sup>139</sup>, propia de los electrones cuando pasan por un medio a baja velocidad (Figura 6.115).

Sólo unas pocas partículas atómicas son estables, lo que quiere decir que la mayoría muestran un período de vida muy corto. Fotones, neutrinos, electrones, protones y sus correspondientes antipartículas, antineutrinos, positrones y antiprotones son las más duraderas. Los neutrones pueden llegar a una veintena de minutos, y los mesones sólo a micromillonésimas partes de segundo. Las partículas neutras suelen tener un poder de penetración superior dado que no se ven afectadas por la resistencia de otras partículas cargadas en el medio que atraviesan. De este modo provocan una serie de fenómenos que han sido recogidos también por las placas fotográficas, como la inclinación de sus trayectorias, el desalojo de partículas cargadas o el quebrantamiento de núcleos atómicos. Los trazos establecidos en las emulsiones dependen, por tanto, de la velocidad, de la masa y de la carga de las partículas. A partir de las características del trazado podemos calcular estas tres variables, aunque con dos de ellas se puede inferir el valor de la tercera, ya que sabiendo la masa es fácil conocer la carga<sup>140</sup>.



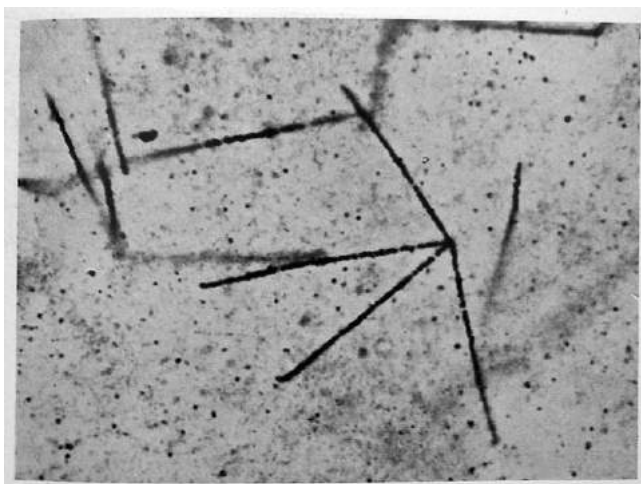
*Fig. 6.115. Dispersión elástica de un protón por un núcleo pesado. Placa Ilford B1. Powell y Occialini, 1947.*

La fotografía ha jugado un papel fundamental en la detección de partículas tanto en las emanaciones radiactivas como en rayos cósmicos. Tanto las emulsiones convencionales en un primer momento, como las desarrolladas posteriormente de forma especial para la captación de partículas, son las responsables del descubrimiento y del estudio del comportamiento de gran número de ellas. La comprensión del funcionamiento del átomo y de las interacciones entre las partículas que lo constituyen no se hubiera podido llevar a cabo sin la colaboración de la fotografía, bien a través de las diferentes cámaras de expansión, bien de las emulsiones nucleares. Es más, el conocimiento adquirido durante décadas sobre el modo de ser y comportarse de estas partículas ha sido decisivo para comprender el comportamiento a nivel atómico de las propias emulsiones fotográficas, tal como intuyó Marietta Blau desde un principio<sup>141</sup>. Recordemos que las reacciones de los átomos de las sales de plata ante la presencia de los fotones son explicadas desde estos años en términos de física atómica. La formación de la imagen fotográfica latente se debe a la liberación de electrones por la acción directa de los fotones. Por consiguiente, fotoconductividad y conductividad iónica son dos procesos básicos del fenómeno fotográfico<sup>142</sup>.

#### **6.2.7.4. El método fotográfico en el estudio de las partículas**

El estudio de las partículas a partir de los trazos presentes en las emulsiones fotográficas nucleares se lleva a cabo mediante el análisis de diversas variables, como son la densidad u opacidad que presentan dichos trazos en la película, el recorrido de cada una de ellas a lo largo de las placas, los efectos de estrella, dispersión, escisión, giros, etc., y la disposición geométrica y relaciones espaciales que se observan entre unas y otras<sup>143</sup> (Figura 6.116). Para ello, la industria fotográfica, a partir de los ensayos previos de determinados científicos y ante la fuerte demanda de los laboratorios científicos, comenzó a fabricar emulsiones especializadas que reprodujeran lo mejor posible este tipo de figuras. Fueron emulsiones con un alto grado de uniformidad en cuanto a la sensibilidad de los





*Fig. 6.116.. Estrellas producidas por el radiotorio. En este caso la emulsión ha sido bañada con el material radiactivo. Powell y Occhialini. 1947.*

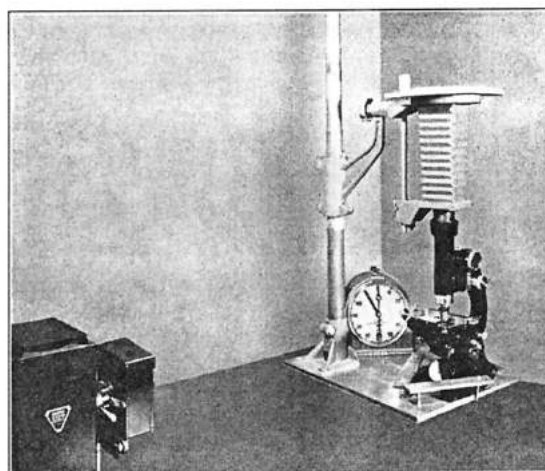
granos de sales de plata, rasgo conseguido mediante un control exhaustivo del tamaño de los mismos; ausencia de granos velados, y una alta proporción de sales de plata en la amalgama respecto de la cantidad de gelatina, llegándose hasta un 80% del total. Las emulsiones nucleares eran fáciles de distinguir por su grosor acentuado, normalmente entre 400 y 600 micras, pero pudiendo llegar incluso a un milímetro. Su presentación, como en el caso de las emulsiones convencionales, venía dada en varios grados de sensibilidad. La presencia acentuada de haluros de plata en las emulsiones de grado más fino era óptima para estos

fines debido a la resolución geométrica ofrecida y a la alta densidad que presentaban en los trazos. Por otro lado, su grosor pronunciado las hacía idóneas para recoger los trazados largos producidos por determinadas partículas; mientras que las diferentes sensibilidades disponibles estaban orientadas a poder cubrir distintos tiempos de exposición y recoger los trazos provenientes de partículas con mayor o menor pérdida de energía. El material fotográfico fabricado específicamente para estos menesteres requería un tratamiento especial en las diferentes fases del proceso fotográfico, desde la exposición, pues cada partícula presenta un comportamiento distinto a la hora de impresionar la emulsión, hasta el revelado, baño de paro y fijado. Para cualquier fotógrafo convencional, asiduo al cuarto oscuro y familiarizado con el procesamiento de material en blanco y negro, probablemente sea de gran interés conocer que el proceso completo para la obtención de una placa de estas características requería 172 horas, una semana aproximadamente<sup>144</sup>. Esto, sin contar con que las exposiciones llegaron en ocasiones a tiempos de seis meses<sup>145</sup>. Básicamente, el proceso seguía los siguientes pasos: se colocaba la película en un soporte de cristal, se imprimía en ella ligeramente un entramado con coordenadas que facilitará posteriormente la localización de los trazos, y se bañaba en Amidol durante dos horas a 5°C para asegurar una distribución uniforme del revelador. Posteriormente se subía la temperatura a 23°C y se revelaba durante 30 minutos o algo más; se seguía con un baño de paro de una hora y media de duración; luego el fijado, que se hacía a 5°C durante 72 horas renovando el fijador un par de veces; y por último un lavado de 72 horas, también a 5°C, y de forma gradual con tiosulfito para que el cambio con respecto al baño fijador no fuera brusco. Las bajas temperaturas evitaban que la emulsión se hinchara y se produjeran deformaciones. El lavado se acompañaba de una última fase en la que se añadían al agua una serie de endurecedores que evitaban que se desprendieran las diferentes capas de emulsión especialmente si estaban destinadas a un lugar seco. Por último, el secado requería de 24 a 36 horas en un lugar a temperatura ambiente y con un índice de humedad apropiado. Como es de suponer, los procedimientos de laboratorio fueron muy variados en el curso del desarrollo de esta técnica<sup>146</sup>; si hemos destacado éste en particular, es por entender que fue el más común, una vez que los grandes laboratorios se lanzaron a la fabricación de emulsiones especializadas en estos fines. De hecho, este proceso de revelado, con cambios tan drásticos de temperatura, denominado en su día *revelado en frío*, fue ideado por Occhialini para evitar la deformación de las emulsiones, especialmente las de un milímetro de grosor<sup>147</sup>.

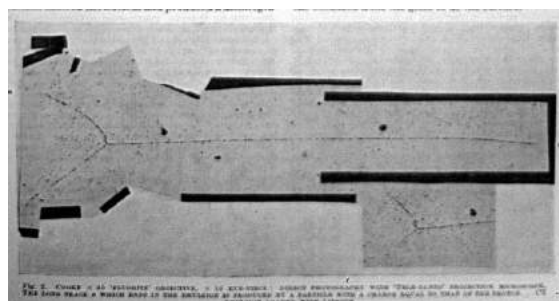


### 6.2.7.5. Mosaicos fotográficos

Para la visualización y estudio de los trazos impresos en las placas era necesario el uso de microscopios, ya fueran convencionales o de fabricación especial, con objetivos apocromáticos, de aceite, y tubo binocular para la observación de los mismos, o monocular para la fotomicrografía propiamente dicha (Figura 6.117 y 6.118). En ocasiones, se han utilizado microscopios reflectores, invirtiendo el sentido de la proyección de la luz y estudiando la emulsión desde detrás<sup>148</sup>. Normalmente se suele ampliar entre 10 y 100 aumentos, y se utiliza óptica de distancias focales largas dado el grosor acentuado de las emulsiones. La técnica de iluminación solía ser la Koehler<sup>149</sup>. En todo el proceso de obtención de placas es determinante conocer la estabilidad de la imagen latente, especialmente cuando se está obligado a esperar un tiempo prolongado entre la exposición y el revelado, como es el caso de la fotografía de rayos cósmicos, o cuando se utilizan aceleradores de partículas, donde cabe la posibilidad de que otro tipo de radiación afecte al material fotosensible. Por lo general, las emulsiones de grano fino suelen ser más propensas a una desestabilización o pérdida de la imagen latente, y factores como la humedad o las altas temperaturas favorecen también este proceso. Una de las aplicaciones en las que este tipo de emulsiones tuvo mucha aceptación fue hasta fechas muy recientes en la autorradiografía. Tan sólo decir al respecto, que las emulsiones nucleares se han utilizado en multitud de tareas que trascienden su uso exclusivo como herramienta para la observación directa de partículas. A la autorradiografía, o trazado que producen las emanaciones radioactivas en las placas, hay que añadir su aplicación en las diferentes cámaras de expansión, como la de niebla, la de burbujas y la de destello, en los aceleradores de partículas, y en electronografía.



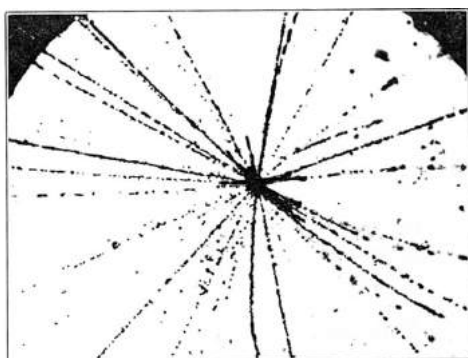
*Fig. 6.117. Dispositivo para fotomicrografía de emulsiones nucleares. Tschiderer, I. 1950.*



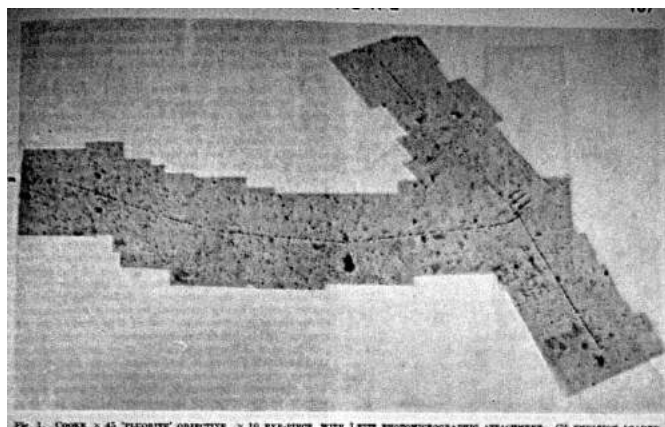
*Fig. 6.118. Emulsión C2 cargada con litio. Mosaico microfotográfico. Fotografía hecha con la ayuda de un microscopio de proyección, tipo "Tele- Panto". 1947.*

Debido al formato reducido de las imágenes presentes en las placas, y al grosor de las emulsiones, los trazos registrados solían desbordar las posibilidades de encuadre del microscopio, tanto en extensión como en profundidad. Esto obligaba en numerosas ocasiones a tomar varias fotomicrográficas de la copia original con la ayuda del microscopio, para acto seguido formar entre todas ellas, a modo de mosaico, una imagen íntegra, en dos dimensiones, del fenómeno. El resultado de estas composiciones no deja de recordarnos propuestas plásticas posteriores de artistas-fotógrafos como Gordon Matta Clark, David Hockney o Jan Dibbets (Figuras 119 y 120).

Una dificultad aparece entonces, debido a la profundidad de foco tan limitada que tienen estos objetivos, lo que se traduce en que sólo los objetos situados en una capa muy plana están en estricto foco. En estas circunstancias, es posible fotografiar un trazo con una sola exposición siempre que se encuentre en un plano paralelo a la emulsión. De otra manera, si está sumergido, es necesario enfocar diferentes partes del trazo, y hacer una sucesión de fotografías. Estas se pueden colocar superpuestas posteriormente, en forma de mosaico, de la misma manera que se viene haciendo en fotografía aérea. Un método similar se utiliza también cuando el objeto es muy grande para ser fotografiado en una sola toma bajo el microscopio, algo que ocurre con frecuencia.<sup>150</sup>



**Fig. 6.119.** Estrella formada por rayos cósmicos, realizada con 25 exposiciones consecutivas, a razón de dos micras de variación del plano focal. Tschiderer, I. 1950.



**Fig. 6.120.** Emulsión C2 cargada con litio, que muestra el trazo de mesones. Mosaico microfotográfico. 1947

A veces, era necesario realizar un número considerable de exposiciones de la copia original, hasta 25 o 30, dependiendo del grosor de la emulsión. Así, por ejemplo, en una emulsión de 50 micras podían realizarse exposiciones que iban desde la parte superior a la inferior de la misma, a razón de ir variando el plano focal 2 micras cada toma. Los negativos se enumeraban, y se construían un mosaico final que nos mostraba el fenómeno en su integridad<sup>151</sup> (Figura 6.121). Igualmente, cuando la extensión de los trazos sobrepasaba la posibilidades de encuadre del microscopio, era necesario realizar varias exposiciones a lo largo del recorrido de la partícula para poder exhibirla en su conjunto (Figura 6.122).

#### **6.2.7.6. Mesones y electrones**

Dentro del método de las emulsiones nucleares, tal vez sea el mesón, partícula cuya masa se encuentra entre las del electrón y el protón, la más representativa. Su existencia teórica fue anunciada en 1935 por H. Yukawa, siendo fotografiada dos años más tarde con la ayuda de una cámara de niebla por C. D. Anderson y S. H. Neddermeyer; y por C. F. Powell, G. P. S. Occhialini y C. M. G Lattes a partir de 1940 en sus distintas variedades con la técnica de las emulsiones nucleares. La confirmación de la existencia de varias formas de mesones despejó grandes dudas sobre la composición del núcleo atómico, al establecerse la diferencia entre piones (p mesón), mesones más pesados y con grandes interacciones con los protones y los neutrones, y los muones (m mesón), más ligeros y de interacciones de carácter

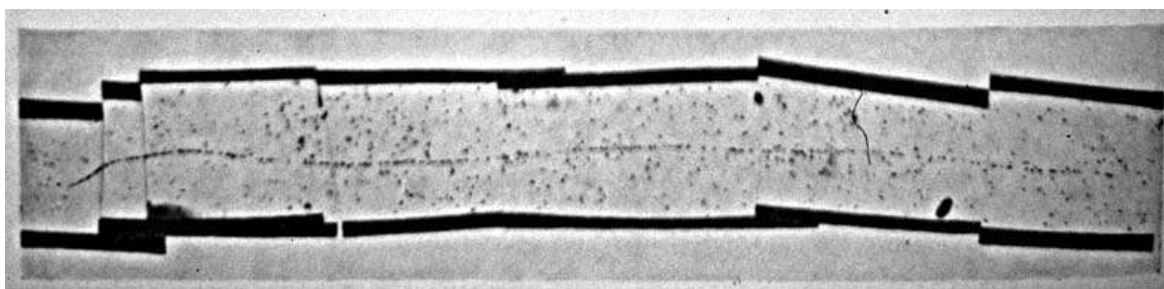


Fig. 6.121. Mosaico microfotográfico. Fotografías con microscopio de proyección. 1947.

electromagnético<sup>152</sup>. En este contexto, fueron decisivas las expediciones hechas en 1948 al Pic du Midi en los Pirineos; al Kilimanjaro, en Tanzania; y al Chacaltaya, en Bolivia. Los trazos presentes en las placas fueron estudiados en detalle por Occhialini y Powell, quienes constataron la existencia de esta variedad de partícula, y resaltaron el importante papel jugado por ella en el universo atómico<sup>153</sup>.

*En términos muy generales, podemos decir que las fuerzas dominantes en el reino de las estrellas, o en la mecánica celeste, son las de atracción gravitacional; en el dominio de los átomos las fuerzas electrostáticas; y en el reino del núcleo las fuerzas de los mesones .*<sup>154</sup>

*La importancia de estas partículas es extraordinaria, porque, dicho en palabras coloquiales, constituyen algo así como la argamasa de los núcleos atómicos, y, consecuentemente, al asegurar la estabilidad de éstos, son en realidad la que mantienen la estructura del propio universo .*<sup>155</sup>

Ese mismo año de 1948, los mesones fueron detectados también por medios artificiales con la ayuda del sincro- ciclotrón de Berkeley<sup>156</sup>. Este hecho coincidió con la fabricación de nuevas emulsiones mucho más sensibles que permitieron por primera vez el registro fotográfico de los electrones. El azar y la suerte, como en tantas otras ocasiones, jugó en favor de la ciencia, pues las investigaciones estaban dirigidas en realidad a probar la sensibilidad de las placas ante los protones. R. W. Berriman, del Laboratorio de Investigación de Kodak, estaba proyectando neutrones de una fuente de radiación de radio- berilio contra una placa situada detrás de una lámina de plomo de 17 cm, cuya función era evitar un exceso de radiación y en las placas. Tras analizar los trazos de los protones en las fotografías, descubrió detrás un fondo homogéneo de pequeños trazos cortos y curvados que se correspondían con electrones<sup>157</sup> (Figura 6.123). Posteriormente, en 1953, fueron descubiertos los t-mesón (tau mesón) por G Belliboni, B, Sechi y G. T. Zorn en una expedición a Cerdeña. En esta ocasión, se registró su acción en los rayos cósmicos a una altitud de 80.000 pies, utilizando emulsiones nucleares del tipo G5 de Ilford, en formato de 15x20

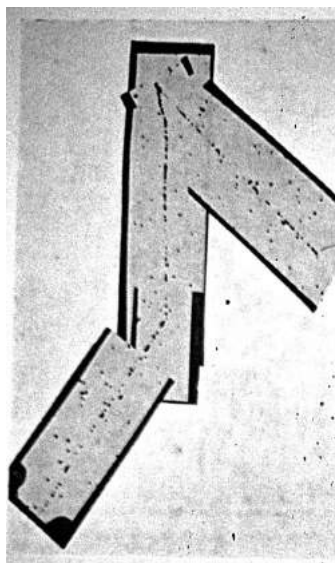
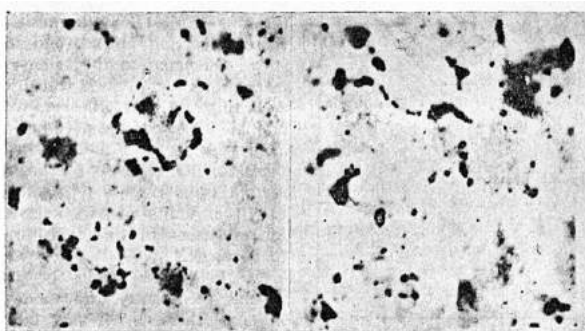


Fig. 6.122. Emulsión C2 cargada con boro. Mosaico microfotográfico. Fotografía directa con microscopio de proyección. 1947.



cm, y 600 micras de grosor, apiladas hasta formar bloques de dos centímetros y medio. Ciertamente, un gran número de partículas sólo pueden ser detectadas en la radiación cósmica. Las emulsiones, en este sentido, se utilizaron preferentemente como modo de registro directo de los fenómenos, emplazándolas a diferentes altitudes sin la intervención de ningún medio artificial adicional. Las pruebas se llevaron a cabo en distintas altitudes: a miles de metros de altura, a nivel del mar y en las profundidades de lagos helados.

*Normalmente, para hacer ese tipo de exposiciones no es necesario sacar las emulsiones de las cajas tal como vienen de fábrica, ya que la mayoría de las radiaciones pasa sin problemas a través del material de embalaje. Las placas se colocan generalmente de manera que la superficie de la emulsión quede posicionada en un plano vertical.*<sup>158</sup>

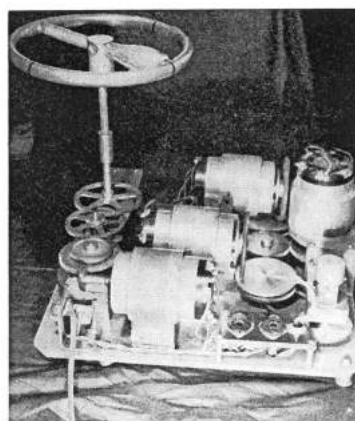


*Fig. 6.123. Trazos de electrones en emulsiones nucleares. Berriman, R. W. 1948.*

La experimentación de nuevas fórmulas continuó sin descanso, la mayoría de ellas dirigidas a conseguir mejores respuestas de las emulsiones. A veces, se probó depositando las emulsiones en condiciones de vacío, de frío intenso, bajo planchas de plomo de varios centímetros<sup>159</sup>, o en contacto directo con sustancias radiactivas a la salida de los aceleradores de partículas que fueron generando partículas de mayores niveles de energía con los años<sup>160</sup>. Los dispositivos fotoeléctricos fueron sugeridos para el estudio de

las emulsiones por la propia Marietta Blau. En 1950, ideó un artilugio de naturaleza electromecánica para facilitar las complicadas tareas de cuantificación, tales como medición de distancias, ángulos, y densidades, o conteo de granos y de otros rasgos presentes en las emulsiones<sup>161</sup>. El aparato acometía estas tareas mediante la articulación de un sistema mecánico a base de ruedas, pedales y volantes que el operario movía a su voluntad de acuerdo con el trazado de las partículas, tal como era observado a través del microscopio (Figura 6.124.). El ocular de este último estaba marcado con un par de aros concéntricos, de manera que el operario podía posicionar con gran precisión, cualquier punto de la imagen, e ir recorriendo en el plano bidimensional de la placa cada uno de los trazos elegidos para el análisis. La máquina, por sí sola, se encargaba de contar los detalles en la emulsión, grano a grano, y de hacer valoraciones

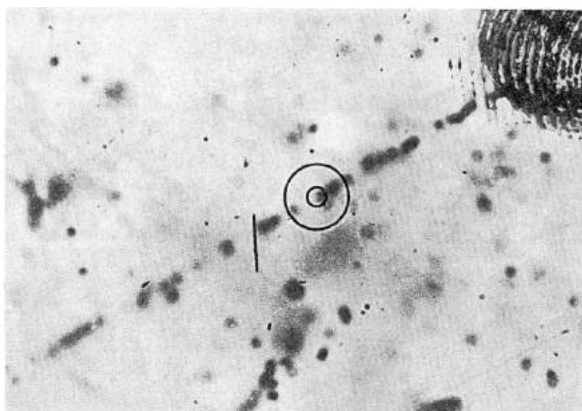
sensitométricas (Figura 6.125). El sistema se completó con un dispositivo de salida, responsable de imprimir sobre papel los resultados relativos a densidades, posiciones y número de granos (Figura 6.126.). El conjunto de operaciones se apoyaba en una serie de dispositivos electrónicos, como células fotoeléctricas, fotomultiplicadores y amplificadores que hacían posible la detección de los distintos niveles de densidad presentes en las emulsiones, y de



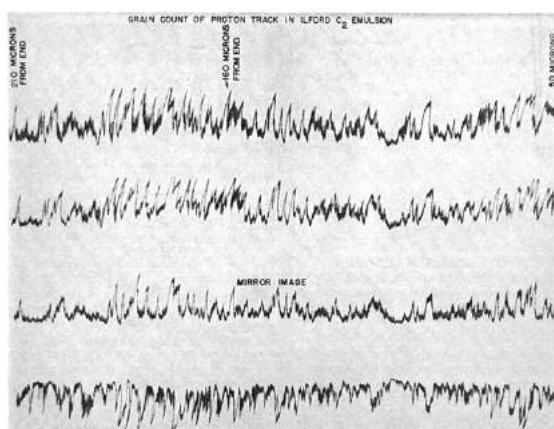
*Fig. 6.124. Dispositivo semiautomático para el análisis de los trazos de partículas registrados por emulsiones nucleares. Parte mecánica del sistema de conducción. Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum. 1950.*



representarlos sobre el papel de acuerdo con sus posiciones. El prototipo contemplaba también la posibilidad de llevar directamente las señales a un ordenador, con capacidad para realizar todas las operaciones de forma automática.



**Fig. 6.125.** Fotomicrografía y aros para la determinación de posiciones. Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum, S. 1950.



**Fig. 6.126.** Registro de las densidades de los granos de un trazo de protones. Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum, S. 1950.

Como hemos observado a lo largo de estas páginas, la técnica de registro de partículas con emulsiones nucleares se llevó a cabo en numerosas ocasiones poniendo en contacto el material fotográfico con elementos radiactivos, normalmente, colocando las placas en las proximidades de estas fuentes, o



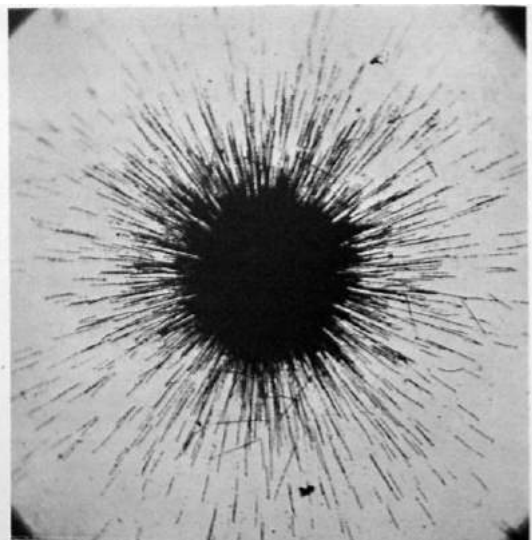
**Fig. 6.127..** Partículas alfa de un átomo de torio en proceso de desintegración. Webb, J. H. 1948.

impregnando la propia emulsión con soluciones de esas propiedades<sup>162</sup>. (Ver fig. 6.113; y Figuras 6.127; y 6.128). Una técnica similar a ésta, consistió en bombardear las placas preparadas de esta última forma con neutrones de baja velocidad, para detectar fragmentos de fisión de los átomos (Figura 6.129). Todas estas experiencias fueron dando lugar a una nueva forma de producción de imágenes, denominada *autorradiografía*, donde la radioactividad se convierte en la principal responsable del proceso, en substitución de la luz o de los haces de electrones.

### 6.2.6. La radioactividad como fuente creadora de imágenes

A partir de la segunda guerra mundial, la producción artificial de isótopos radiactivos, y el control de los procesos de fisión nuclear a partir de la experiencia obtenida en la fabricación de nuevos reactores nucleares y bombas atómicas, posibilitó la utilización de este tipo de elementos químicos para fines de observación y registro de nuevos fenómenos. Recordemos que las primeras demostraciones de los efectos fotográficos que esta clase de radiación produce se retrotraen a los trabajos que Niépce de Saint Victor llevó a cabo en 1876 con las sales de uranio, y a las investigaciones de H. Becquerel, conducentes al

descubrimiento en 1896 de la propia radioactividad (ver Cap. 3.4.). Pero fue la guerra la que marcó una línea divisoria entre dos campos de actuación de la ciencia en lo que a radioactividad se refiere. Por un lado, encontramos el estudio de las partículas subatómicas a partir de su manifestación en las emisiones de los elementos radiactivos, y del correspondiente registro por las emulsiones nucleares y la cámara de niebla, preferentemente; y por otro, el uso de esos elementos para desvelar estructuras y procesos dinámicos en todo tipo de materiales, orgánicos e inorgánicos, en substitución de la luz y de otras radiaciones.



*Fig. 6.128. Trazo de partícula alfa en emulsión nuclear. La placa fue rociada con ligeras motas de radio; después de varios días fue revelada y fotomicrografiada. Powell- Occhialini. 1947.*



*Fig. 6.129. Dos fragmentos de fisión de un átomo de uranio235. Webb, J. H. 1948.*

Nos encontramos en una época de posguerra, pronto denominada de *guerra fría*, caracterizada por el binomio información- secreto. Si el concepto de información, contemplado desde una perspectiva puramente matemática, invade el conjunto de las ciencias físicas y humanas; es realmente el secreto y el recelo en desvelar precisamente información relativa a los avances científicos el factor que marca el curso de estos años. Los archivos clasificados proliferan en el conjunto de ciencias estrechamente relacionadas con objetivos militares, o con cualquier conocimiento que pueda poner en entredicho la *seguridad nacional*, un concepto omnipresente en los medios científicos y en los despachos del poder económico y político de la época<sup>163</sup>. Este control de la información afectó de pleno al desarrollo de la ciencia, abriendo un período histórico lleno de oscurantismo, violencia soterrada y medidas represivas contra el conjunto de la población y de determinados científicos. El juicio contra Werner Oppenheimer, las muertes en extrañas circunstancias de Ettore Majorana<sup>164</sup> y Alan Turing<sup>165</sup>, las continuas acusaciones de espionaje científico e industrial, o de sabotaje, a ambos lados del *telón de acero*; la recuperación de científicos filonazis para puestos de responsabilidad en estamentos científico- tecnológicos, o el trato discriminado contra otros de reputación, hasta entonces, intachable, son ejemplos de ello. En el caso de la imagen científica, este secretismo afectó al desarrollo de las técnicas más relacionadas con investigaciones en el ámbito nuclear, radiactivo, aeroespacial, o de fenómenos de alta velocidad ligados a balística, o a explosivos, áreas en las que la fotografía desempeñó un papel de primer orden. Ni que decir tiene que este clima de ocultismo en ciencia perdura hasta nuestros días, agravado por los intereses comerciales de los grandes laboratorios; todo ello en consonancia con el nuevo poder establecido por los medios de comunicación de masas y la correspondiente suspicacia y práctica de la lectura entre líneas que el conjunto de la sociedad debe hacer frente a la información facilitada de textos e imágenes.

#### **6.2.6.1. La ionografía: más allá de lo fotográfico**

El hecho de que la radioactividad pasara a ser una fuente de iluminación más para la observación de fenómenos naturales, y que se convirtiera en una nueva fórmula de producción de imágenes, forzó la puesta al día del propio concepto de fotografía, o de imagen técnica en ciencia. Es sintomático que fuera Pierre Demers, uno de los principales investigadores de las emulsiones nucleares, quien propusiera en 1958 el término *ionografía* para designar el nacimiento de una nueva ciencia, y de un nuevo concepto integrador del conjunto de sistemas de producción de imágenes<sup>166</sup>. La ionografía, asemejada en este caso a la fotografía corpuscular, sería la ciencia del conjunto de trazos y figuras materializados en cualquier tipo de sólido. Los sistemas comprenderían dos procesos básicos: uno relativo a los dispositivos de detección, y otro, a los procesos. El proceso de detección estaría referido fundamentalmente a los fenómenos ocurridos tanto a nivel del núcleo atómico como del cosmos. Esta amplitud de miras, obligaría a incluir en este esquema disciplinas tan distantes como la astronomía, la biología o la geofísica, y técnicas como la autorradiografía, la resonancia magnética nuclear, o la difracción de electrones. Los procesos de detección, por su parte, estarían referidos fundamentalmente a la fotografía de la luz, concepto que abarcaría, entre otras materias, los fenómenos de interacción entre la luz y las partículas a través del estudio de las emulsiones, de formación de imágenes, del color, o el análisis microscópico.

Aunque el esquema de Demers no trascendió al campo de las aplicaciones, sirvió para llamar la atención de la comunidad científica sobre la necesidad de expandir el concepto del proceso de formación de imágenes. De hecho, a partir del final de la guerra, la radioactividad comenzó a ser utilizada sistemáticamente como fuente de *iluminación* para la observación de fenómenos, una vez que la técnica autorradiográfica fue depurada. Paralelamente, comenzaron a ser estudiados sus efectos directos sobre la materia, originándose una nueva disciplina dedicada al estudio de los trazos en todo tipo de objetos. Las marcas nucleares en sólidos, observadas fundamentalmente a través de los distintos tipos de microscopía, abrió un nuevo campo de exploración en la ciencia y una nueva forma de visualización de fenómenos relacionados con la radioactividad. El concepto de fotografía se vio expandido hasta límites insospechados, al comprobarse que para la producción de una imagen era válido cualquier forma de energía y cualquier tipo de soporte capaz de almacenar los resultados. Desde entonces, las sombras proporcionan no sólo información relativa al estudio de las proyecciones geométricas, de los tamaños, de la composición o de las intensidades formadas por la luz y los objetos, tal como ocurrió con las sombras de las pirámides estudiadas por Thales, sino que nos permiten también investigar nuevas reacciones, procesos de formación, o el tiempo de existencia de los cuerpos y de los fenómenos producidos en la naturaleza.

#### **6.2.6.2. Fuentes de nuevas imágenes**

El control de la producción de cada una de las radiaciones emitidas por los materiales radioactivos (alfa, beta y gamma), y de determinadas partículas constitutivas del átomo, fundamentalmente neutrones, protones y positrones, sirvió para la creación de una serie de instrumentos de observación de gran trascendencia en la historia de la ciencia. Para esclarecer este panorama tan diverso, producto de las múltiples combinaciones que pueden darse entre las distintas fuentes de iluminación y las diversas formas de registro, es preciso esquematizar la información y atender a aquellas fórmulas con mayor impacto en el ámbito científico. Ante todo, hay que tener presente que la entrada de la



radioactividad en la escena científica, forzó una distinción entre lo que se conoce como *radiaciones electromagnéticas*, debidas a la propagación simultánea de campos eléctricos y magnéticos, y con un espectro que se extiende desde las ondas de radio a los rayos gamma; y las *radiaciones corpusculares* o *nucleares*, consistentes en la propagación de partículas, entre otras, electrones, protones, neutrones, rayos alfa (núcleos de helio producidos en desintegraciones radioactivas), rayos beta (electrones positivos o negativos producidos a partir de neutrones), mesones, y electrones- sincrotrones. Una distinción adicional viene dada por el poder de ionización que presentan las radiaciones, indistintamente del grupo a que pertenezcan. Las radiaciones ionizantes (rayos alfa, beta, gamma, y partículas cargadas eléctricamente) producen iones a su paso por la materia. Este fenómeno se traduce en una serie de cambios físico-químicos de los materiales, tales como la disociación de moléculas, la producción de radicales libres, de iones excitados, alteraciones físicas como la dureza, o la conductibilidad eléctrica y térmica, y alteraciones del equilibrio atómico. El fenómeno de la radioactividad se caracteriza por afectar a todos los isótopos de todos los elementos químicos, produciendo un estado de inestabilidad o de excitación, consistente en una continua pérdida de energía. Este proceso se traduce en una emisión constante de radiaciones electromagnéticas o de partículas que perdura hasta que el elemento en cuestión consigue un estado fundamental o estable. De este modo, cuando el proceso responde a un cambio de energía de los electrones, se producen rayos X; si se trata de un cambio de energía de los nucleones (neutrones y protones del núcleo), son los rayos gamma los que se manifiestan. Por el contrario, cuando se produce el cambio de un isótopo pesado en otro más ligero, se emiten partículas como los neutrones o los protones. Toda esta variedad de emisiones son utilizadas por la ciencia en multitud de aplicaciones, que van desde mediciones de espesores y estudios dinámicos en metalurgia, a análisis químicos, radioterapia, quimioterapia, estudio de marcadores radioactivos en seres vivos, etc.; hasta llegar a las distintos sistemas de visualización de fenómenos, tales como la *autorradiografía*, el *trazo nuclear en sólidos*, o la *radiografía nuclear de neutrones*, *protones y positrones*.

#### **6.2.6.3. La autorradiografía**

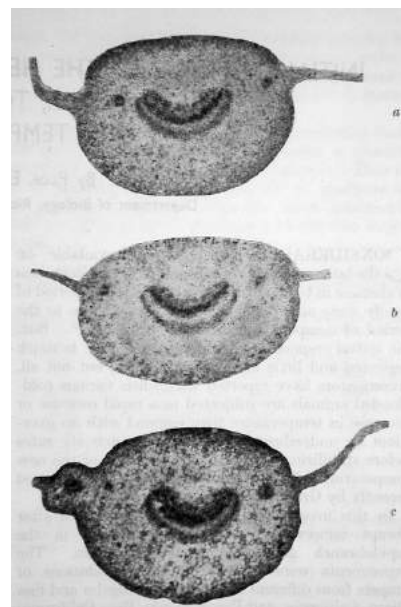
La autorradiografía es una técnica de producción de imágenes que nace de forma natural de la experiencia obtenida por la fotografía de sales de plata, y las emulsiones nucleares y de rayos X. Los primeros ensayos dirigidos a encontrar una fórmula de registro fotográfico del efecto producido por los elementos radiactivos en los seres vivos, surgieron en 1924, de la mano de A. Lacassagne. Este autor, junto a otros colaboradores, estudió el efecto de las radiaciones ionizantes del polonio en muestras biológicas<sup>167</sup>. Estas primeras experiencias coincidieron en fecha con la puesta en práctica del procedimiento de suministro de contrastes para el estudio radiográfico de las distintas partes del organismo humano. En este contexto, destacaron las figuras de Walter Dandy, creador de la *ventriculografía*, o técnica de visualización del sistema ventricular del cerebro mediante rayos X, previa inyección de aire filtrado en ese órgano; y la del nóbél portugués Egas Moniz, más conocido por la aplicación de leucotomías prefrontales, o extirpación de determinadas partes del cerebro a enfermos mentales. Este último consiguió llevar a cabo en 1927 numerosas arteriografías cerebrales, o *angiografías*, tal como él prefirió denominarlas<sup>168</sup>.

Entre 1940 y 1943, en plena guerra mundial, tuvieron lugar los primeros estudios destinados a detectar e identificar la presencia de sustancias radioactivas, como el yodo, en la glándula tiroides. Estas primeras pruebas se llevaron a cabo poniendo en contacto los especímenes con emulsiones del tipo



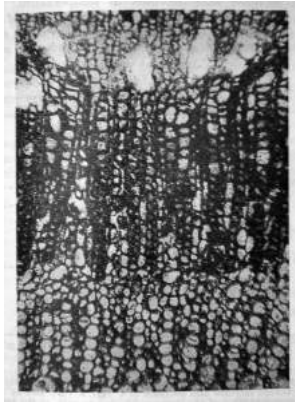
diapositivas o transparencias. En 1946, una vez concluida la contienda, C. P. Leblond y L. F. Belanger pusieron en práctica un nuevo procedimiento autorradiográfico con el que consiguieron resoluciones mayores, consistente en pintar el espécimen directamente con emulsión de sales de plata. Las técnicas fueron depurándose con los años a partir de la utilización de películas de rayos X y de emulsiones nucleares, en muchos casos, derretidas para lograr un mejor contacto con las muestras. Una de las claves para conseguir imágenes de mayor resolución fue, tal como vimos en el capítulo anterior, mediante la fabricación de emulsiones con un 80% de bromuro de plata con una presencia mínima de gelatina, sustancia muy absorbente de la mayoría de estas radiaciones<sup>169</sup>. La industria fotográfica, previo a decidirse por la fabricación de este tipo de emulsiones, estudió en detalle los trabajos realizados con anterioridad por M. Blau y P. Demers, Cesar Lattes, descubridor del pion, S. Freier, estudioso de los rayos cósmicos, y Dodd y Waller, investigadores de Ilford.

La autorradiografía se aplica de forma preferente en las ciencias biológicas y en medicina, donde es acompañada normalmente de otras técnicas de detección radioactiva, como los contadores Geiger de flujo de gas, cámaras de ionización y centelleadores. Mientras que éstas últimas suministran información muy precisa sobre los niveles de radioactividad en un punto determinado de la muestra, ayudadas de fotomultiplicadores y amplificadores de señales, las técnicas autorradiográficas son acumulativas, y dan cuenta de la distribución y localización de la radiación. Con el paso de los años, la autorradiografía se ha extendido a numerosas ramas de la ciencia y la tecnología. Tal es el caso de la ingeniería, para el estudio de lubricantes y de los estados de pureza de distintos materiales; o de la mineralogía, la geología, la metalurgia, y la cromatografía<sup>170</sup>. La técnica autorradiográfica dispone de distintos procedimientos, dependiendo del tamaño de los objetos a estudiar. En los primeros años de su desarrollo, esta herramienta se aplicó a nivel macroscópico, de manera especial en el estudio de láminas de metal, cromatogramas, hojas y tallos de plantas, minerales, y partes concretas de organismos animales como glándulas, piel, huesos o fibras. El procedimiento, en este caso, consiste en colocar durante un tiempo prolongado los especímenes que han sido suministrados con alguna sustancia radiactiva, como sales de uranio, torio o radio, en contacto con la película fotográfica de rayos X, a ser posible en un medio al vacío para favorecer la unión entre ambos materiales. El proceso de desintegración del elemento radiactivo produce electrones de alta velocidad, capaces de sensibilizar la emulsión, dando lugar a una imagen latente representativa de la distribución, localización y concentración de la sustancia en el objeto (Figura 6.130).



*Fig. 6.130. Autorradiografía en película Kodak para rayos X de una sección transversal de petiolos tratados con carbono 14. 1962.*

Para el análisis microscópico de los objetos tratados, es necesario la participación de los distintos tipos de microscopios, ópticos y electrónicos, y de sus respectivos procedimientos fotomicrográficos. La resolución de las imágenes se consigue con emulsiones de grano muy fino y con técnicas muy elaboradas que permiten limitar a un mínimo la presencia de la gelatina. Básicamente, existen dos procedimientos, el de *película separable* (stripping), en línea de continuidad con la técnica anterior de transparencia o diapositiva, y el de *inmersión* (dipping, o liquid



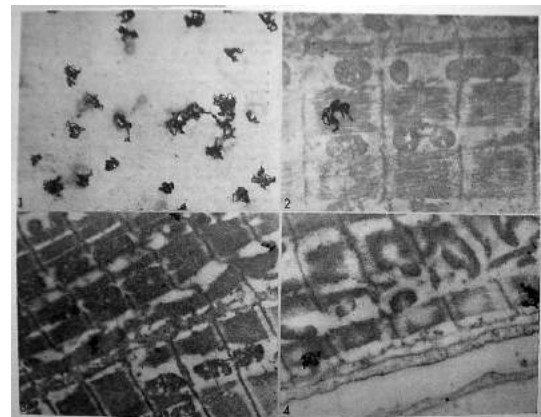
*Fig. 6.131. Película autorradiográfica despegable Kodak sobreimpuesta sobre una sección de un tallo de tabaco. Las zonas oscuras pertenecen a bandas de xilema en cuyas paredes se ha depositado el carbono 14. 1962.*

emulsion), ambos muy utilizados en el estudio de especímenes diminutos e irregulares, preferentemente del universo celular. El primer procedimiento fue desarrollado en 1950 por Kodak, firma que pronto pasó a comercializar películas autorradiográficas de un grosor muy reducido, y depositadas sobre placas de cristal. Esta modalidad permite que se puedan cortar porciones muy reducidas de película, y despegarlas cuidadosamente del cristal (stripping) para ser colocadas sin demora sobre el espécimen. Esta

operación se suele hacer en un medio líquido, como agua destilada, a fin de conseguir que la capa de gelatina de la emulsión se desprenda en el proceso, y sólo sean las sales de plata las que entren en contacto con la muestra. Una vez seco el conjunto formado por la emulsión y la muestra, que ha sido sometida previamente a un tratamiento radiactivo, se expone durante un período de tiempo de horas o semanas. Por último, tan sólo queda revelar el material, siguiendo procedimientos convencionales, y fotomicrografiar los resultados (Figura 6.131.). En el caso de la técnica de emulsión líquida, o por inmersión, el procedimiento es similar, con la salvedad de que la emulsión es directamente vertida sobre el espécimen una vez tratado radioactivamente.

El estudio microscópico de las fotografías obtenidas sigue en líneas generales los procedimientos desarrollados en la técnica de las emulsiones nucleares, por medio de la contabilización de granos de plata, estudio geométrico de los trazados, o de la delimitación de los niveles de densidad. Los mejores niveles de resolución en las placas se obtienen por medio de la utilización de radiaciones de corto alcance, como la alfa, y la beta de baja energía, ambas presentes en isótopos muy comunes como el tritio o el carbono 14. Existen fórmulas indirectas de exponer las placas haciendo uso de alguna sustancia fluorescente que se deposita entre la placa y el espécimen. En este caso, el ennegrecimiento de la placa se debe a la acción de la luz emitida por fluorescencia, y no a la radiación directamente<sup>171</sup>. A partir de 1956, comenzó a ser aplicado el microscopio electrónico en el análisis de las placas autorradiográficas, llegándose pronto a niveles de resolución de unos pocos cientos de angströms<sup>172</sup>.

En biología y medicina prosperó el uso de esta combinación de técnicas para el análisis celular, de tejidos y fibras, especialmente con emulsiones sensibles a la radiación alfa (Eastman Kodak NTA), diluidas en gel para conseguir un mejor contacto de muestra y material fotográfico, y con tiempos de exposición de varias jornadas<sup>173</sup>. El calentamiento de las emulsiones a temperaturas de 45°C, punto de licuefacción de las mismas, la preparación de las muestras en completa sequedad, o las exposiciones realizadas a bajas temperaturas, fueron técnicas ejercitadas en estas fechas para lograr un mejor resultado en las copias destinadas a ser observadas a través del microscopio<sup>174</sup>. Al poco tiempo, comenzó a extraerse la



*Fig. 6.132. Estudio con "Digoxin tritriado" de las células del miocardio de ranas y perros con el método de la autorradiografía combinado con la microscopía electrónica. 1963.*

capa de gelatina de la emulsión para lograrse una perfecta transparencia a la acción del haz de electrones del microscopio, a la vez que comenzaron a utilizarse centelleadores y dispositivos electrónicos para determinar con precisión la pérdida de energía de los marcadores durante el proceso de revelado, fijado y lavado<sup>175</sup> (Figura 6.132). El microscopio electrónico comenzó a ser aplicado también al análisis de los trazos producidos por las reacciones nucleares, una vez que los fenómenos radiactivos, tanto naturales como artificiales, y sus efectos sobre distintos materiales, comenzaron a ser tenidos en cuenta<sup>176</sup> (Figura 6.133.)



*Fig. 6.133. Trazos nucleares en cristal irradiado, vistos con el microscopio electrónico. 1964.*

La fotografía pronto se convirtió en una herramienta óptima para el registro de las marcas y trazos producidos en los objetos próximos, o afectados por el paso de partículas pesadas de gran carga, fruto de los procesos de fisión. De esta misma manera, comenzó a ser utilizada para detectar la presencia de los elementos radiactivos en numerosos materiales. En 1946, Irene Curie señaló la conveniencia de utilizar la



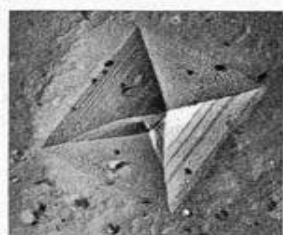
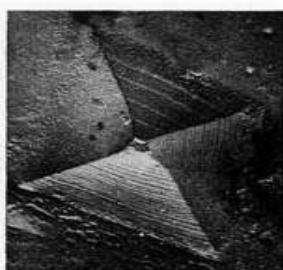
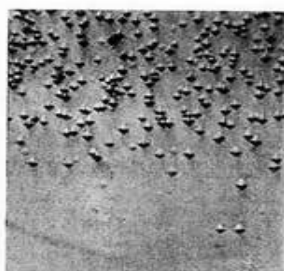
*Fig. 6.134. Trazos de partículas radioactivas en una roca, detectados con emulsiones fotográficas. Técnica de doble exposición en el microscopio óptico. 1949.*

fotografía para determinar la presencia de uranio y torio en distintas rocas; y al año siguiente, N. Yagoda y N. Kaplan la utilizaron para comprobar la desintegración constante que sufre el uranio<sup>177</sup>. En un principio, no se pudo determinar con certeza hasta qué punto los trazos observados en las placas eran debidos a la presencia de elementos radiactivos en las rocas, en el cristal de las sales de plata, o en la amalgama de las propias emulsiones. Efectivamente, se realizaron exposiciones de placas fuera del contacto de los objetos irradiantes y aparecieron determinadas estrellas, propias de la radiación alfa. Este hecho suscitó varias hipótesis que atribuyeron este comportamiento a la acción de rayos cósmicos, o a la arena utilizada en la fabricación de los cristales<sup>178</sup>. Técnicas de doble exposición en el microscopio óptico ayudaron a obtener fotografías que dilucidaron cuándo la distribución de las partículas pertenecía a la muestra, y cuándo al cristal o a las propias emulsiones<sup>179</sup> (Figura 6.134.)

#### **6.2.6.4. Los trazos nucleares en sólidos**

A principios de la década de los cincuenta, los estudios sobre la presencia de elementos radiactivos en la atmósfera, en especial del tritium y del carbono 14, y la fijación del método de datación cronológica de sustancias orgánicas a partir de este último<sup>180</sup>, suscitó el interés de los científicos por el estudio de los trazos provocados por los elementos radiactivos, o por la emisión de *neutrones térmicos*<sup>181</sup>, en el conjunto de materiales, tanto naturales como artificiales. Las primeras imágenes fotográficas de los trazos radiactivos producidos en sólidos, tras ser observados fehacientemente con la ayuda de diferentes microscopios, datan de 1958, y son debidos a D. A. Young del Centro de Investigación de la Energía Nuclear, de Harwell, Gran Bretaña<sup>182</sup> (Figura 6.135.). Al año siguiente, E.





**Fig. 6.135. Trazos radiactivos en cristales de fluoruro de litio, por acción de neutrones térmicos, correspondientes a fragmentos de fisión. 1958.**

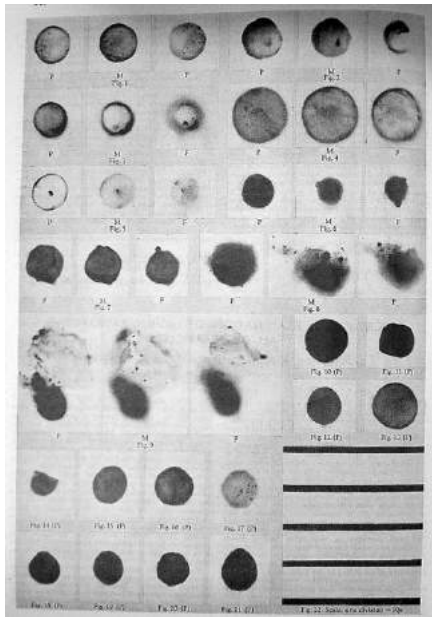
C. H Silk y R. S. Barnes, investigadores de este mismo centro, realizaron las primeras fotografías de los daños producidos por la fisión del uranio  $U^{235}$  en cristales de mica<sup>183</sup>. A partir de estos trabajos, comenzó a proliferar el estudio de los trazados nucleares en distintos tipos de materiales, tanto de origen natural como de fabricación humana, o ya fueran producidos por fenómenos radiactivos, naturales o artificiales. En este contexto, es preciso señalar la abundancia de estudios realizados en torno a los efectos ocasionados por las numerosas pruebas nucleares llevadas a cabo en diferentes partes del planeta por las grandes potencias. Las observaciones fueron realizadas mediante técnicas autorradiográficas, de radiodetección, ionogramas, estudios de densidad electrónica, gravímetros, sismógrafos, y mediante el estudio microscópico de los trazados nucleares en el polvo y las partículas encontradas en hojas y recipientes de plástico situados a cientos de kilómetros del lugar de las explosiones<sup>184</sup> (Figuras 6.136. y 6.137.)

Con el tiempo, el análisis de los trazos nucleares mediante los microscopios óptico y electrónico se convirtió en un técnica imprescindible en ramas como la geocronología, oceanografía, física de rayos cósmicos, estudio de meteoritos, ciencia lunar, física nuclear, análisis químico y micro- químico y dosimetría de radiaciones, con resultados prácticos en tecnologías tan diversas como la nuclear, del armamento, o de fabricación de cerveza<sup>185</sup>. Así por ejemplo, el estudio de los trazos nucleares en meteoritos abrió las puertas a un campo de investigación muy fructífero en astronomía, dedicado a dilucidar el origen del sistema solar o de cada uno de los planetas<sup>186</sup>. También los trazos del carbono 14 detectados en plantas y xilemas ayudaron a comprender mejor el crecimiento de las paredes de las células y de las formaciones presentes en los canales y cavidades de este tipo de seres vivos<sup>187</sup> (Ver Figura 6.131). Pronto, esta técnica se aplicó a la observación de trazos en minerales naturales que no habían sido irradiados deliberadamente, comprobándose cómo dos fuentes fundamentales de generación de partículas pesadas se encuentran en el origen de estas marcas: los fragmentos procedentes de la fisión espontánea del uranio, y la desintegración de los núcleos por la acción de los rayos cósmicos<sup>188</sup> (Figura 6.138.).

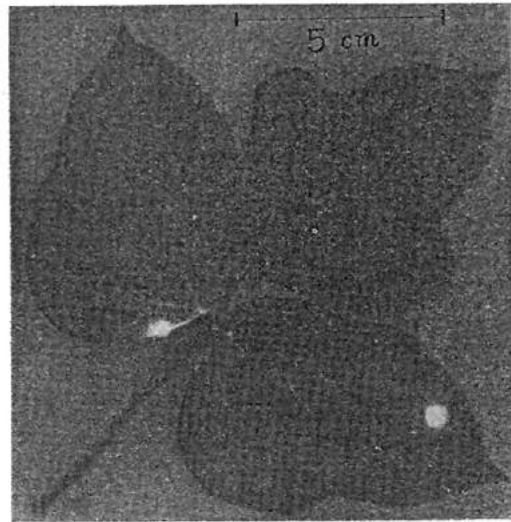
Respecto de estos últimos, es digno de mención, los trazos observados en el casco de una nave del proyecto Apolo, producido por este tipo de radiaciones (Figura 6.139.). El envío de naves al espacio fue, de hecho, una gran oportunidad para observar la acción de otros fenómenos cósmicos como las fulguraciones solares a través del estudio de los trazos nucleares producidos en los equipos enviados fuera de nuestro planeta. Tal fue el caso de una cámara de televisión destinada a fotografiar la superficie lunar, como parte del instrumental de la nave Surveyor III, que fue rescatada posteriormente por los astronautas del Apolo XII, fotografiada mediante este tipo de técnicas<sup>189</sup>. De otro lado, el análisis geofísico de rocas extraídas de fondos marinos ha permitido el estudio de la formación y desplazamiento de los continentes a través del estudio de los trazos nucleares conservados intactos en el basalto, gracias a las bajas temperaturas. La datación cronológica por estos medios se ha aplicado también con notable éxito en



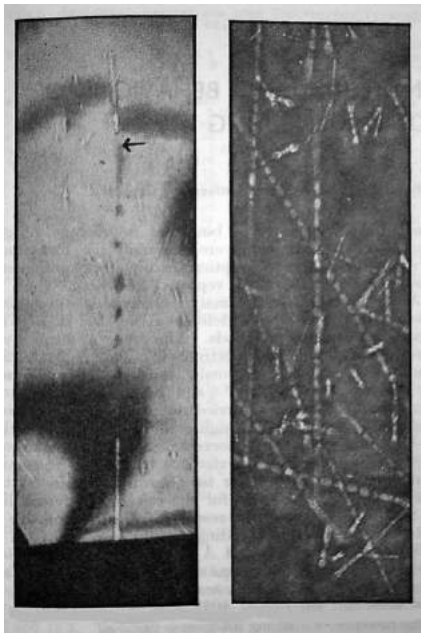
ámbitos de la arqueología, la geología y la ciencia espacial. Dado que los trazos nucleares desaparecen cuando los materiales son expuestos a altas temperaturas, es fácil determinar el período de existencia de determinados objetos fósiles o de fabricación humana que han sufrido procesos de este tipo en algún momento de la historia, e incluso fijar las edades de objetos pertenecientes a los principios del sistema solar. Ejemplos de ello, son el estudio de utensilios, herramientas y restos humanos prehistóricos, o de zonas geográficas del planeta, a partir del impacto de meteoritos u otros objetos extraterrestres. (Figura 6.140.).



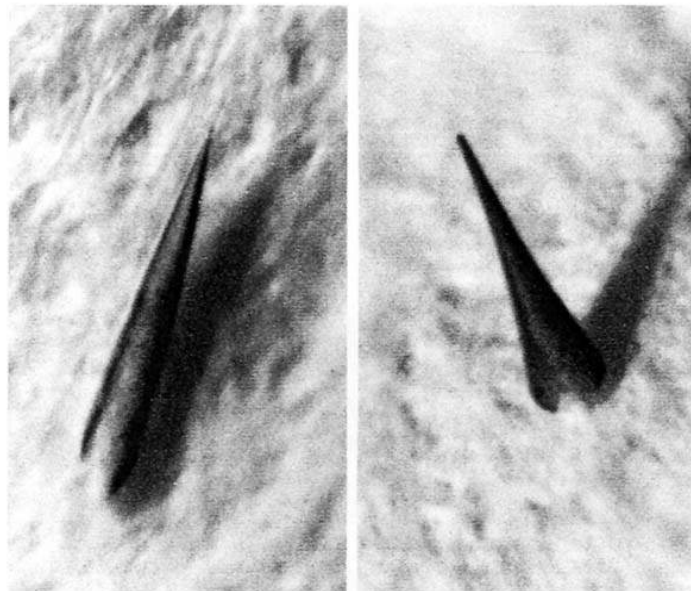
**Fig. 6.136.**  
*Fotomicrografías de partículas radioactivas procedentes de las explosiones nucleares rusas de septiembre y octubre de 1961, en las cercanías de Japón. 1962.*



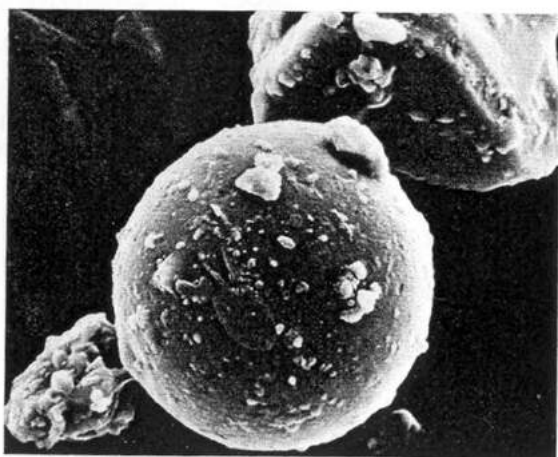
**Fig. 6.137.** *Autorradiografía de hoja para estudio de deposición de partículas radioactivas. 1962.*



**Fig. 6.138.** *Trazos nucleares en cristal de biotita, observado con microscopio electrónico (TEM). Los trazos son originados por procesos de fisión de impurezas de uranio presentes en el mineral. 1962.*



**Fig. 6.139.** *Trazos nucleares de rayos cósmicos en el casco de una nave Apolo construida con policarbonato Lexan. 1971.*



*Fig.6.140. Glóbulo cristalino de roca lunar de la expedición Apolo 11. 1969.*

La técnica de observación y estudio de los trazos nucleares en sólidos fue perfeccionándose con los años, con el apoyo de las técnicas microscópicas existentes. El aumento del contraste de los trazados, por ejemplo, se ha llevado a cabo regularmente con técnicas de interferencia, de contraste de fase, o depositando determinadas sustancias en las ranuras de las marcas, tales como películas de metal opaco, plata, o ácido nítrico que acentúan su profundidad. Así también, se han utilizado tintes fluorescentes combinados con el uso de radiación UV o de luz polarizada. Para las labores de identificación y recuento de los detalles más sobresalientes en las imágenes, los dispositivos electrónicos

han sido los más adecuados por su rapidez, precisión y mayor sensibilidad, destacando, entre ellos, las técnicas de escáner, los microscopios automáticos, los contadores de destellos y las técnicas electrolíticas<sup>190</sup>. Por último, el continuo avance en la construcción de aceleradores de partículas y la utilización de materiales dieléctricos naturales y sintéticos, tales como el cristal, la mica y distintos tipos de plástico, ha marcado el devenir de estas técnicas hasta nuestros días, especialmente como nueva forma de registro de los trazos, en substitución de las emulsiones nucleares

*Hay que admitir que la grabación de trazos fue descubierta a partir de nuestros intentos por mejorar la sensibilidad de la mica. Tras una serie de observaciones preliminares del trazo astillado, producido por el impacto de partículas (Price y Walker, 1962), hicimos un gran esfuerzo para lograr un incremento de la sensibilidad, y poder detectar así el trazado de partículas más ligeras. Con el tiempo, fuimos comprobando como la mica y otros dieléctricos presentaban un comportamiento único a la hora de diferenciar entre partículas ligeras y pesadas .<sup>191</sup>*

Esta posibilidad de utilizar materiales de detección dieléctricos junto con los procedimientos fotográficos convencionales, las emulsiones nucleares y de rayos X , unido a la disponibilidad creciente de dispositivos electrónicos de lectura, tales como escáneres, abrieron un nuevo campo de aplicación en radiografía.

#### **6.2.6.5. De la gammografía a la radiografía de neutrones**

A partir de los años cincuenta, comenzaron a desarrollarse nuevas técnicas de visualización por medio de la generación de rayos gamma y de la proyección de haces de neutrones y protones como resultado del perfeccionamiento de la construcción de aceleradores de partículas, desde entonces más compactos, provistos de voltajes y campos magnéticos y eléctricos mayores, y con un control más exhaustivo de la emisión de partículas. La naturaleza electromagnética de los rayos gamma fue señalada por Meitner y Koster en 1933<sup>192</sup>, hecho que redundó en una mayor comprensión de este fenómeno y en la creación posterior de nuevas

técnicas de imagen complementarias de los rayos X. Tras el final de la guerra, la producción de rayos gamma comenzó a llevarse al terreno práctico con la creación de la *bomba de cobalto*, generadora de radioactividad a partir de este elemento químico, con gran aplicación en medicina y en metalurgia. A un mismo tiempo, los rayos gamma comenzaron a ser generados con la ayuda de los aceleradores de partículas tipo betatron, mediante la interrupción o frenado de haces de electrones de alta velocidad. Dado el gran poder

de penetración de este tipo de radiación, sus aplicaciones han sido mayormente en el campo de la detección de fisuras y anomalías en metales, en soldaduras y grietas a semejanza de los rayos X, y en la destrucción de células vivas y esterilización de productos y alimentos. Si en un principio la escasa sensibilidad de las placas fotográficas ante la radiación gamma impidió el desarrollo de sistemas de visualización *ad hoc*, con el paso de los años fueron apareciendo técnicas que subsanaron estos defectos, fundamentalmente, por medio de la focalización de los rayos en un punto y el uso de centelleadores capaces de generar destellos susceptibles de sensibilizar las placas en menor tiempo<sup>193</sup>. Este tipo de mejoras dio lugar en 1957 a la *cámara gamma*, conocida también como *cámara Anger*, en honor a su creador Hal Anger. En ella estaban presentes un colimador de plomo en forma de matriz para correlacionar los puntos de destellos con los puntos de formación de la imagen, y

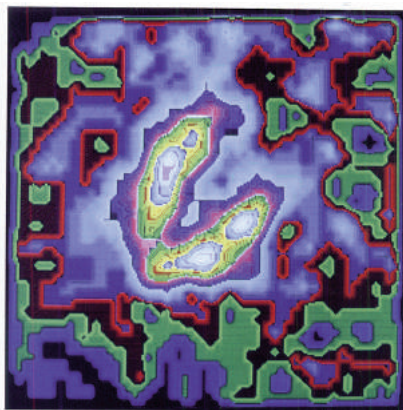


Fig. 6.142. Gammografía o centellograma (coloreada) del corazón y sus ventrículos. c.a. 1990.

fotomultiplicadores para conseguir una amplificación adecuada de las señales generadas por el centelleador. El uso de marcadores radioactivos en este tipo de técnicas, tanto de rayos X como gamma, abrió en su día un campo de aplicación de gran trascendencia en el campo de la medicina, con el desarrollo de técnicas específicas que perduran hasta nuestros días, como la urografía, la arteriografía, la pielografía, o la serialografía ( ver Figuras 6. 101; y 6. 102). En la actualidad, la gammografía se lleva a cabo mediante técnicas de visualización *in vivo*, tales como la *SPECT* (Single Photon Emission Computed Tomography), donde se combina el uso de marcadores isótopos, como el Tectenio 99 o el Yodo 131, inyectados intravenosamente, con tecnologías escáner, centelleadores y procesamiento informático ( Figuras 6.141, 6.142. y 6.143.).

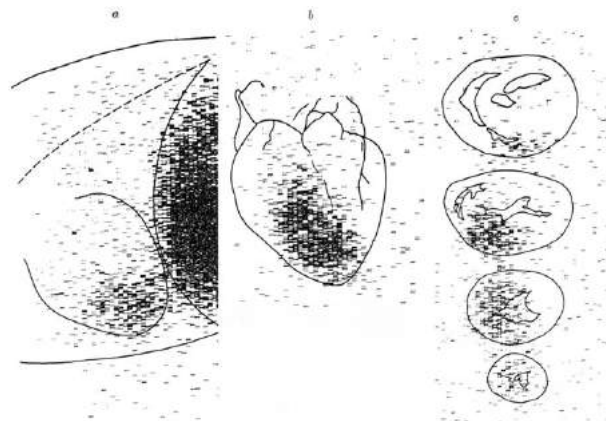


Fig.6.141. Escáner del corazón de un perro. a) en vivo; b) in vitro; c) in vitro, en capas. Realizadas con el Nucleograph de Siemens. 1967.

En el ámbito de la producción de imágenes autorradiográficas por proyección sobre las muestras de partículas cargadas, con el fin de provocar efectos detectables y observables, han ido apareciendo nuevas técnicas a lo largo de la segunda mitad del siglo XX a un ritmo constante y con resultados desiguales. Existen intentos desde 1952 para aprovechar el uso de partículas alfa con estos fines<sup>194</sup>. La facilidad que tienen estas partículas para ser absorbidas por los materiales, su propagación en línea recta y sus efectos acentuados sobre las



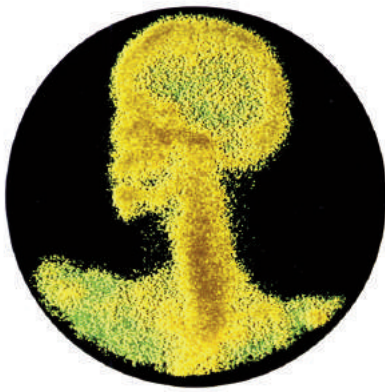


Fig. 6.143. Gammografía de los huesos para detección de tumores. (Coloreado.) c.a. 1990.

emplazadas en su proximidad, un hecho precursor en el campo de la exploración de los procesos autorradiográficos producidos por compuestos no radioactivos. Experiencias más recientes en esta dirección aseguraron que los efectos autorradiográficos son capaces de propagarse de una placa expuesta a otra intacta, tan sólo con poner en contacto ambas *a posteriori*, lo que no deja de producir curiosidad y admiración (Figura 6.144).

*Transferencia de radiación: este es un efecto encontrado en películas expuestas, y que no han sido reveladas, al ser almacenadas en contacto unas con otras durante 24 horas. Este efecto fue estudiado en sí mismo, y los resultados se muestran en la figura. A la izquierda están las películas originales expuestas a la radiación de los bloques; mientras que a la derecha, están las no expuestas a los bloques, pero dejadas en contacto con las películas de la izquierda antes de ser reveladas. El tiempo de dicho contacto fue de 24 horas o más.*<sup>197</sup>

Mientras estas investigaciones seguían su curso, la búsqueda de nuevas fórmulas destinadas a conseguir nuevas vías de visualización de los fenómenos ocultos en la materia, encontró en otras partículas (neutrones, protones y positrones) mejores y más prácticos resultados. Recordemos que las primeras experiencias en este sentido fueron los haces de *neutrones térmicos* producidos en reactores nucleares, y utilizados desde 1958 en el trazado de cristales (Young, 1958). Pero los primeros intentos por crear técnicas de observación *ad hoc*, útiles para el estudio de la localización y distribución de los efectos producidos por la acción de radiaciones ionizantes en organismos, datan de principios de esta misma década. Para ello, se puso en práctica una combinación de técnicas, compuesta por dispositivos de barrido que recordaban a la

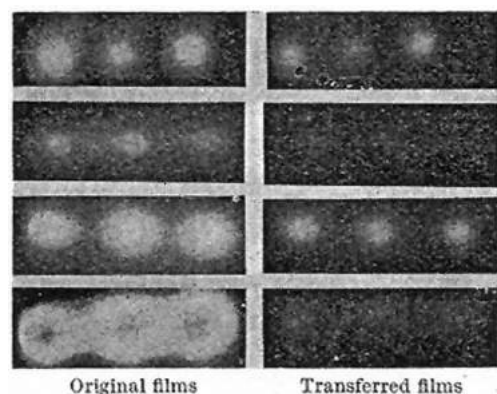


Fig. 6.144. Efecto autorradiográfico producido en placas fotográficas por la acción de distintos compuestos no radioactivos, y efecto de transferencia producido por las placas expuestas al ser colocadas junto a las no expuestas. 1961.



tecnología de televisión, y escáneres de punto móvil, esta vez acoplados a detectores (tipo contador Geiger o centelleador), y focalizados en regiones muy puntuales de la muestra; todo completado con tecnología de pulsos y de tubos de rayos catódicos para la observación y registro fotográfico de los fenómenos<sup>198</sup> (Figura 6.145.).

Al mismo tiempo, las técnicas autorradiográficas avanzaron hacia el uso de emisiones de neutrones térmicos producidos en reactores nucleares y proyectados sobre organismos vivos y materiales diversos, preferentemente cristales<sup>199</sup>. Este avance permitió la visión de los procesos de distribución, de desajuste molecular, o de daños producidos en los objetos por las radiaciones<sup>200</sup> (Figura 6.146 y 6.147. Para principios de los sesenta, la resolución de las imágenes comenzó a ser mejorada notablemente con el control de la emisión de este tipo de haces y con la mejora paulatina de los detectores. Estos hechos confluyeron en la puesta en práctica de nuevas fórmulas híbridas, electrónicas y fotográficas, basadas en la nueva tecnología de semiconductores, de generación de pulsos, intensificadores de imagen, centelleadores, cámaras de destellos y osciloscopios de alta velocidad. Las técnicas de inyección intravenosa de contrastes isótopos en el ámbito de la biología y la medicina, se vieron ampliamente beneficiadas por este nuevo tipo de tecnología (Figura 6.148.). Una de las ventajas de utilizar haces de neutrones térmicos como vía de profundización en el interior de la materia, vino dada por su facilidad para provocar partículas alfa en elementos no radioactivos, susceptibles de ser documentadas mediante técnicas autorradiográficas o de escáner. Esta nueva capacidad abrió las puertas al desarrollo de un nuevo tipo de radiografía, denominada en sus orígenes de *reacción nuclear*<sup>201</sup>, complementaria de la de rayos X y con una amplia aceptación en el ámbito del diagnóstico clínico por imagen. Una de ellas, la *radiografía de neutrones* utiliza placas elaboradas con materiales isótopos como el boro 10 o el uranio U<sup>235</sup>, que son colocadas en contacto con detectores sensibles a las radiaciones alfa y fabricados con nitrato o acetato de celulosa. Las muestras son irradiadas con el haz de neutrones, y la imagen se forma en la placa de celulosa por proyección como resultado de la reacción ocasionada en el boro y el uranio (Figura 6.149). La radiografía de neutrones es más sensible a los elementos ligeros, presentes en la muestra, tal como el hidrógeno, por tener la facultad de dispersar marcadamente los haces neutrónicos. Esta cualidad, unido a la alta resolución de sus imágenes, la sensibilidad en la

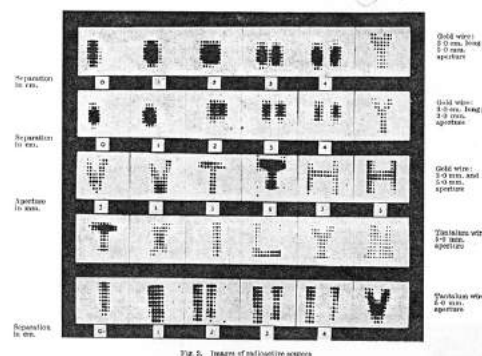


Fig.6.145. Imágenes relativas a diversas fuentes radioactivas, captadas con un dispositivo de escaneado. 1951.

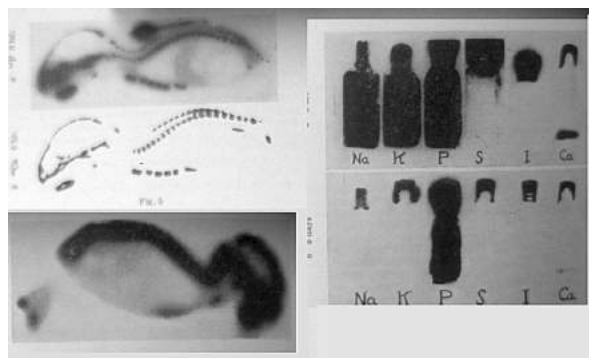


Fig. 6.146. Autorradiografías de ratas y frascos sometidos a un flujo de neutrones térmicos. 1960.

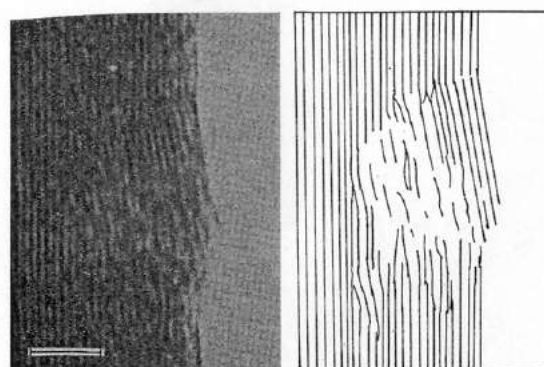
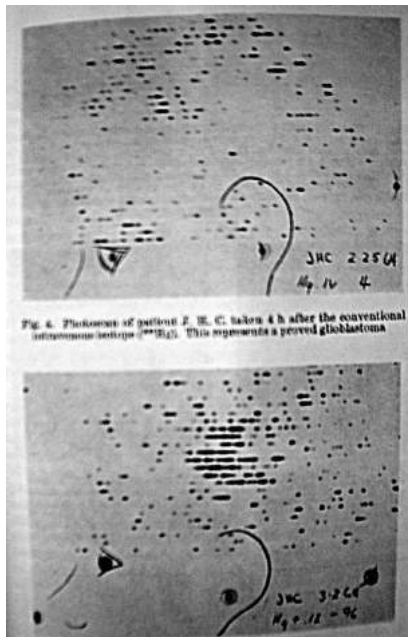


Fig.6.147. Acción de neutrones térmicos sobre cristales. Fotografía y diagrama. 1961.



**Fig.6.148.. Fotoescáner de la acción de isótopos en tejidos malignos por oxigenación local. 1964.**

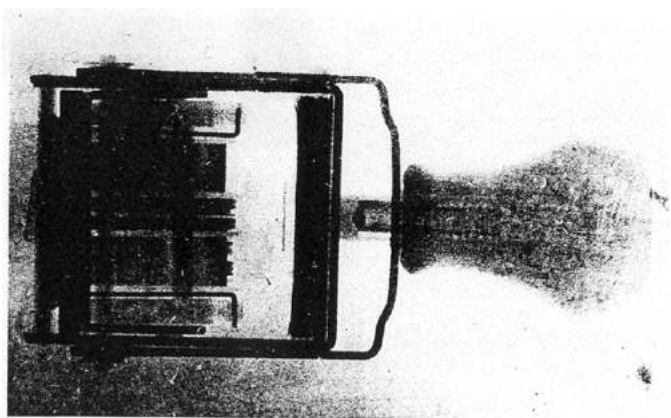
discriminación de espesores, o su utilidad en ambientes de alta radiación, la convierten en una técnica idónea para la observación de materiales orgánicos, ya sean tejidos biológicos o explosivos, y para el estudio de las concentraciones de los elementos químicos<sup>202</sup>.

*Las imágenes radiográficas por neutrones se producen por la interacción de los haces de neutrones térmicos con los núcleos atómicos de los tejidos celulares de la muestra; mientras que una radiografía por rayos X se produce por la interacción de los electrones con los átomos de la muestra. Por consiguiente, la contribución de la radiografía de neutrones es la creación de imágenes cuyas características reflejan la variación en el contenido de átomos de hidrógeno, y no la mera densidad*

<sup>203</sup>

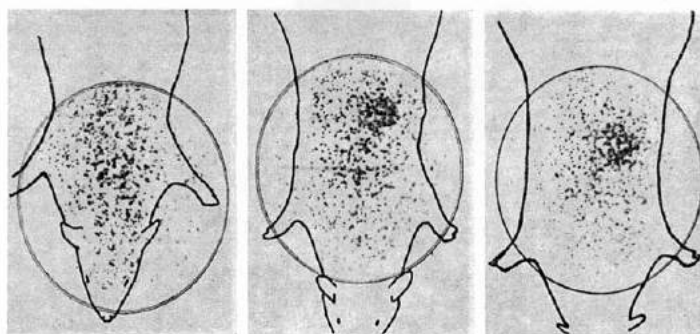
Por su parte, la *radiografía de protones* y la de *iones pesados*, atienden a procedimientos de generación de imágenes muy parecidos a la anterior. La de protones es más sensible a los cambios pequeños de densidad y de masa del

especimen que son detectados a lo largo del haz de partículas. Los haces de protones, generados por aceleradores de partículas del tipo sincro- ciclotrón, comenzaron a ser utilizados en la creación de imágenes radiográficas a principios de los setenta. La novedad de esta técnica, respecto de la radiografía de neutrones o de rayos X, es su capacidad para mostrar los límites que conforman la figura de las muestras, y para diferenciar los distintos órganos internos en el caso de análisis de seres vivos<sup>204</sup>. El uso de pantallas intensificadoras y de centelleadores comenzó pronto a ponerse en práctica, asociados a monitores de televisión a fin de obtener una mayor sensibilidad y una visualización *in vivo* de los fenómenos<sup>205</sup>. Por su parte, la producción de haces de iones pesados para fines radiográficos se llevó a cabo con aceleradores del tipo bevatron. En este caso, las muestras eran depositadas en el interior de recipientes con agua para facilitar la formación de distintos niveles de contraste y una separación adecuada de la muestra respecto del fondo<sup>206</sup>. Por último, dentro de estas técnicas de barrido por uso de radioisótopos, encontramos la *cámara de positrones*. Ideada a principios de los sesenta, ha experimentado numerosas modificaciones a lo largo de los años hasta confluir en la actual tecnología *PET: Tomografía por Emisión de Positrones* (Positrón Emisión Tomography). El procedimiento consiste en inyectar un marcador con un radioisótopo de corta duración (fluor 18, carbono 11 o agua marcada con radio) en el flujo sanguíneo, y recoger la emisión de positrones del marcador mediante un detector o escáner a medida que el sujeto o la muestra pasa a través<sup>207</sup>. Esta técnica muestra la actividad



**Fig.6.149.. Radiografía de neutrones de un sello de caucho. Realizada con rayos alfa sobre una superficie de nitrato de celulosa, y una placa adyacente de boro. 1972.**

metabólica de los tejidos, especialmente, el consumo de glucosa en las células, dato de suma importancia en estudios oncológicos, neurológicos y cardiológicos (Figura 6.150.).



*Fig.6.150. Imágenes obtenidas por una cámara de positrones del interior de una rata, administrada con un contraste de fluorborato. Exposiciones de 8-11 min.; 1 h; y 2h, después de la inyección. 1967.*

A partir de la década de los setenta, comenzaron a aparecer nuevas técnicas de visualización, algunas de ellas versiones mejoradas de las ya existentes, como la *Tomografía Axial Computerizada* (TAC) y la *Resonancia Magnética*; u otras, más novedosas, como la *SPECT* (Single Photon Emission Computed Tomography). En todas ellas se ha sabido aprovechar y conjugar el uso de las distintas radiaciones y partículas existentes - rayos X, gamma, radio, etc.- para lograr técnicas de producción de imágenes de dos y tres dimensiones, presentadas *in vivo* y en todo tipo de soportes. La diferenciación conceptual que se establece entre sistemas de producción de imágenes estructurales y funcionales, es hoy de vital importancia en ciencia, especialmente, en campos como la biología y la medicina, donde es preciso distinguir entre la representación estática, relativa a la distribución, tamaño, o intensidad de los fenómenos observados, y la representación dinámica de los procesos acaecidos en el tiempo.

### **6.2.7. Átomos, genes y bits. La difracción de rayos X en la biología molecular**

Si en la primera mitad del siglo XX fue la física la gran estrella de la ciencia moderna, debido en gran parte a la aparición de la relatividad y la cuántica, y al avance de la física nuclear; en la segunda parte del siglo, ha sido la biología molecular la que ha acaparado el protagonismo y la atención del conjunto de la sociedad, particularmente, por su repercusión en temas tan trascendentales como la biogenética, o el control de enfermedades hereditarias, o dependientes de la estructura atómica de las moléculas orgánicas. Este relevo se produjo de forma progresiva, a medida que los métodos e instrumentos propios de la física comenzaron a ser trasladados al ámbito de estudio de los seres vivos. El final de este proceso es de todos conocidos, el conocimiento y prácticas a los que se ha llegado en la actualidad sobre los mecanismos de reproducción celular, de catalogación del genoma de distintas especies, o de clonación celular son temas que trascienden los ámbitos puramente científicos. La riqueza de detalles que presenta este desarrollo nos impide hacer un recorrido exhaustivo sobre cada una de las implicaciones que tiene en el conjunto de la ciencia, de la tecnología, o de la sociedad. Una vez más, atenderemos en estas páginas a los aspectos más relacionados con la imagen como herramienta científica, evaluando en qué medida las técnicas fotográficas, electrónicas y de imagen sintética han influido en el avance de este nuevo campo del conocimiento. Será por lo tanto la técnica de difracción de rayos X en particular, cuyos orígenes y fundamentos fueron tratados en capítulos anteriores (ver cap. 3.6.) la que copará una mayor atención por mi parte, al entender que ha sido su aplicación la que mayor incidencia ha tenido en este proceso. Lo que comenzó siendo una técnica fotográfica de relativa simplicidad, se ha convertido con el tiempo en una herramienta de gran



sofisticación en la que intervienen procesos ópticos, electrónicos y matemáticos, debidamente integrados por ordenadores. En este sentido, la difracción de rayos X ha resultado ser todo un paradigma de la imagen tecnológica de nuestros días, por contener en sí misma todo el proceso histórico de formación de imágenes, desde las fórmulas orientadas a la representación analógica de lo real, propias de la fotografía de sales de plata, a las más recientes de construcción sintética a partir de la aplicación de algoritmos matemáticos. Si la física moderna ha podido extraer de la naturaleza un nivel de conocimiento tan preciso y refinado gracias a su incursión en el universo atómico de la materia, razones similares pueden esgrimirse acerca de la biología molecular y genética, pues ha sido la observación de sus unidades mínimas presentes en células y moléculas, y de las estructuras que componen los seres vivos, la clave de su espectacular desarrollo. Átomos, genes y bits son conceptos que cobran un significado real y práctico a través de la imagen.

#### **6.2.7.1. La física cuántica en biología**

La historia nos enseña que el conocimiento del universo biológico, ha ido creciendo a medida que los instrumentos de observación han recorrido el largo camino que va desde la utilización de nuestros ojos hasta llegar a herramientas que nos acercan al límite de visibilidad de lo atómico. La historia de la biología molecular y de la genética modernas tiene su origen en los trabajos de Gregor Mendel. En 1866, este científico enunció las leyes sobre la herencia, sin previos conocimientos sobre los genes, las mutaciones o los cromosomas, sencillamente basándose en el estudio pormenorizado de la hibridación de guisantes. El método utilizado por Mendel fue observar, sin otro instrumento óptico que sus ojos, las semillas de los guisantes, los frutos obtenidos y sus propiedades más destacables; y a partir de ahí, ir resaltando una serie de constantes numéricas. El término *gen* en sus trabajos hacía mención a cada una de las características observables en los guisantes, tales como el color o el tamaño. Sus teorías pasaron desapercibidas durante décadas, hasta que en 1900 fueron reivindicadas por una serie de autores, entre los que cabe destacar a Hugo De Vries. A partir de entonces, la ciencia emprendió el largo camino de ir desgranando las partes de las que está compuesto ese gen, una entidad hasta entonces más bien hipotética. Se comenzó con el estudio de las células a la luz de los microscopios, que por entonces comenzaron a ahondar en mayores niveles de resolución gracias al uso de la radiación UV. Y una vez aisladas las células, comenzaron a ser diferenciadas sus partes constitutivas: el núcleo y el citoplasma, y en el interior de éstos, los cromosomas, las proteínas y los ácidos nucleicos. En un principio, las proteínas ocuparon el principal foco de atención de los científicos, pero el interés fue desplazándose paulatinamente hacia los ácidos nucleicos y, de forma especial, al ADN, detectado por primera vez en 1871, aunque de forma imprecisa por F. Miescher<sup>208</sup>.

La segunda gran figura en la constitución de la biología molecular fue precisamente el mencionado Hugo de Vries. Tal vez el azar quiso que este científico descubriera en 1902 - dos años después de ser formulada la teoría cuántica por Max Planck- el papel de las mutaciones celulares, explicándola como saltos ocasionados en la línea de descendencia de las especies. No es casualidad, por tanto, que su teoría fuera denominada *teoría cuántica de la biología*, por E. Schrödinger, una de las figuras más representativas de la física cuántica<sup>209</sup>. Física y biología comenzaron de esta forma a estrechar sus lazos. En los años 1926 y 1927 se dio un paso importante en esta dirección, cuando W. Heitler y F. London consiguieron aplicar la teoría cuántica a la formación de los enlaces químicos. Desde entonces, la estabilidad de las moléculas puede entenderse similar a la del átomo. Desde esta perspectiva, las moléculas son contempladas como entidades



que son alteradas exclusivamente por la incorporación de un mínimo de energía equivalente a la diferencia que se necesita para elevarlas a un estado superior, tal como la física venía representando el modelo atómico, con un núcleo atómico rodeado de electrones saltando de una órbita a otra.

Mientras tanto, los instrumentos de observación habían sufrido una gran convulsión con la entrada en escena de los rayos X. Como sabemos, el descubrimiento en 1912, por Laue y Knipping, del fenómeno de la dispersión producido por este tipo de rayos al pasar a través de un cristal de pechblenda, dio origen a la técnica de la difracción de rayos X (ver Cap. 3.6.). El fenómeno, debidamente recogido en placas fotográficas, fue comprendido en toda su extensión por William L. Bragg. Fue este científico el primero en descifrar en 1913 la primera estructura molecular de un cristal: la del cloruro sódico, o sal común. Con este importante hecho, Bragg inició una carrera ejemplar en ciencia, que marchó paralela al rumbo de los grandes acontecimientos ocurridos en el siglo XX; pues de sus primeros estudios en cristalografía de química inorgánica, pasó a la mineralogía y la metalurgia, y posteriormente a la química orgánica y la bioquímica<sup>210</sup>. En este desarrollo le acompañó siempre la técnica de difracción de rayos X, una técnica que aporta a los procesos de visualización algo tan fundamental como desvelar el entramado espacial de los átomos en las moléculas complejas. Al inicio de la década de los treinta, los cristalógrafos comenzaron a interesarse por el estudio de los seres vivos con el uso de esta técnica. El propio Bragg estuvo muy pendiente de los primeros trabajos en esta dirección, preferentemente de los realizados por W. Astbury y J. D. Bernal, quienes aplicaron este tipo de técnica al estudio de las estructuras de distintos compuestos orgánicos, como fibras de pelo, pluma, hueso, seda y algodón, y aminoácidos en vitaminas, respectivamente<sup>211</sup>.

En 1936, se llevaron a cabo en Copenhagen unos encuentros de científicos de gran trascendencia en este nuevo camino de la ciencia. Eran científicos provenientes mayormente del campo de la física, reunidos para discutir cuestiones relativas a la aplicación de la química cuántica al estudio de los genes y de las mutaciones celulares producidas por la acción de los rayos X. A dichas reuniones asistieron físicos de renombre como Niels Bohr o Max Delbrück<sup>212</sup>. Ese mismo año, T. Caspersson pudo fijar la constitución de los cromosomas como una combinación de proteínas y de ácido dextrorribonucleico (ADN)<sup>213</sup>. Dos años más tarde, en 1938, se produjo una nueva reunión en esa misma ciudad en la que se dieron la mano genetistas y cristalógrafos. Una de las ponencias más significativas fue la de C. D. Darlington, que afirmó haber detectado la existencia de una serie de bandas, atribuibles a los genes presentes en los cromosomas, con la ayuda del microscopio óptico; e incluso de haber descubierto estructuras relacionadas *en espiral*, hecho que se confirmaría años más tarde por medio de la difracción de rayos X<sup>214</sup>. El evento coincidió con nuevos hallazgos científicos: la identificación de la macromolécula del ADN a cargo de R. Signer, T. Caspersson y E. Hammarsten, y las primeras fotografías de difracción de rayos X de la hemoglobina, por M. Perutz, J. D. Bernal y I. Fankuchen<sup>215</sup>.

Al otro lado del Atlántico, en el Instituto de Tecnología de California, T. H. Morgan, interesado por la aplicación de la difracción, tanto de electrones como de rayos X, en el estudio molecular, comenzó a reclutar biólogos y químicos con el fin de emprender un gran proyecto científico. Entre ellos, destacó la labor de Linus Pauling, quien profundizó en la aplicación de los principios cuánticos al estudio molecular y de las uniones químicas. Del mismo modo que la física había encontrado una explicación del comportamiento de la materia acudiendo al nivel de los electrones, la biología molecular encontró también en estas unidades mínimas funcionales, una vía para explicar el comportamiento de las moléculas, las

proteínas, y los ácidos nucleicos. La obra cumbre en esta dirección fue *Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals*, que Pauling sacó a la luz en 1939. En ella se describe cómo las moléculas quedan unidas por las órbitas de electrones que componen los átomos, siguiendo el modelo cuántico. Los trabajos teóricos y experimentales de este científico tuvieron una gran repercusión en la bioquímica y la biología molecular de las décadas posteriores. Años más tarde, Pauling, junto a C. D. Coryell y A. E. Mirsky, consiguió explicar la estructura de la hemoglobina, y de forma independiente la estructura y el proceso de formación de los anticuerpos<sup>216</sup>. Una de las conclusiones más sobresalientes extraída por este científico para explicar los fenómenos fisiológicos, fue resaltar la importancia de la forma y el tamaño de las moléculas por encima de la misma composición química, como demostró posteriormente con la fabricación de bactericidas y medicamentos, la síntesis enzimática de las moléculas, o el sistema replicativo de los genes, algo que el propio Pauling estuvo muy cerca de descifrar<sup>217</sup>.

#### **6.2.7.2. Primeros pasos hacia un gran descubrimiento**

En aquellos años previos a la irrupción de la segunda guerra mundial, los trabajos de J. D. Bernal y W. Astbury, ambos cristalógrafos, adquirieron nuevas proporciones como resultado de aplicar el análisis de rayos X a moléculas complejas de elementos orgánicos. Bernal, en colaboración con Crowfoot, ya venía fotografiando desde 1934 cristales de proteínas con este procedimiento. Por su parte, Astbury comenzó en 1938, junto con F. O. Bell, a tomar cientos y cientos de fotografías de fibras de ADN, llegando a la conclusión de que las cadenas de nucleótidos y de péptidos formaban un modelo o plantilla para su formación y reproducción. Esta fue una idea clave para el desarrollo de la biología molecular posterior, especialmente en lo que al ADN se refiere<sup>218</sup>. De hecho, Astbury construyó un modelo de la estructura de este ácido con piezas de metal y varillas que reproducía las posiciones adoptadas por las bases, azúcares y fosfatos presentes. El modelo reprodujo con bastante acierto la posición de las bases y las distancias entre ellas, acercándose al modelo definitivo descubierto años más tarde por J. Watson y F. H. C. Crick. En 1943, en plena guerra, O. T. Avery comprobó en la bacteria neumococo, que el ADN transferido de una célula a otra portaba los genes del donante. Este importante descubrimiento confirmó sus anteriores suposiciones de que era esta sustancia, y no las proteínas como se pensaba hasta entonces, las encargadas de la transmisión de los genes hereditarios. La guerra fue probablemente la responsable de que estas ideas tan reveladoras pasaran desapercibidas durante más de un año, al mantenerse la creencia de que el material responsable de la herencia seguía siendo las proteínas. En 1944, Avery, en colaboración con C. M. MacLeod, y M. McCarty publicaron resultados pormenorizados y esclarecedores, otorgando de forma definitiva esta responsabilidad al ácido desoxirribonucleico (ADN). A partir de 1941, comenzó a ser barajada la idea de que la cadena polipeptídica del ADN presentaba una estructura en espiral, entre otros, por H. S. Taylor. Pero no fue hasta 1952 que estas suposiciones comenzaron a tomarse más en serio, una vez obtenidos resultados más esclarecedores mediante la técnica de difracción de rayos X<sup>219</sup>.

#### **6.2.7.3. Vida más allá de la física**

El conjunto de todos estos avances experimentó un fuerte apoyo a nivel teórico cuando en 1943, Erwin Schrödinger pronunció una conferencia en Dublín, titulada *¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva*. Era la primera vez que uno de los máximos responsables de la creación de la mecánica ondulatoria llamaba la

atención sobre la necesidad de entender los procesos biológicos desde la perspectiva de esta teoría. Una de las tesis más aclamadas y que más físicos arrastró hacia el campo de la biología fue la de entender las moléculas orgánicas como un *cristal aperiódico*.

*El otro camino consiste en ir construyendo un agregado cada vez más extenso sin el torpe recurso de la repetición. Este es el caso de las moléculas orgánicas, cada vez más complicadas, en las cuales cada átomo, y cada grupo de átomos, desempeñan un papel individual, no enteramente equivalente al de muchos otros (como en el caso de la estructura periódica). Con pleno fundamento, podríamos llamarlo un cristal o sólido aperiódico y expresar nuestra hipótesis diciendo: creemos que un gen -o tal vez toda la fibra del cromosoma- es un sólido aperiódico.*<sup>220</sup>

El estudio de la materia viva comenzó a exigir una nueva vía de aproximación, más acorde con su comportamiento libre e incierto, y en esto, la teoría cuántica se adaptaba con gran comodidad. A resultados de esta propuesta, la teoría de la información, o planteamientos más personales como el de Norbert Wiener y su *cibernética*, o el de L. v. Bertalanffy y su *Teoría General de Sistemas*, comenzaron a calar en el pensamiento científico de la época, especialmente en ciencias volcadas al estudio de sistemas complejos como los seres vivos, la conducta humana o las sociedades. La emigración de físicos al campo de la biología molecular fue constante tras el final de la guerra, al tiempo que los conceptos de la biología forzaban una revisión de los planteamientos epistemológicos hasta entonces existentes. El concepto de proyección o de *teleonomía*, presente en Aristóteles y rescatado por E. Mach o J. Monod, o tendencia natural que tiene todo ser viviente de avanzar hacia un fin, sería uno de ellos. Según esta visión, la estructura se vería completada, por tanto, con su finalidad, formando un par indisoluble y, en algunos momentos, hasta contradictorio. Incluso la fotografía y el aparato visual de los seres vivos no pudieron escapar a este tipo de disquisiciones.

*Recordemos el ejemplo del aparato fotográfico: si admitimos que la existencia de este objeto y su estructura realizan el “proyecto” de captar imágenes, debemos evidentemente admitir que un “proyecto” parecido se cumple en la emergencia del ojo de un vertebrado.*<sup>221</sup>

Pronto la infalibilidad y la seguridad de la física comenzaron a ser cuestionadas, al ser comparados sus sistemas con los de los seres vivos, más erráticos y sujetos a la contingencia. Si en los sistemas físicos existen conceptos como el *demonio de Maxwell*, que nos viene a decir que existe algún mecanismo regulador en los gases que escapa a nuestra observación y a nuestra inteligencia, y que hace posible la disminución de la entropía del sistema ( en contradicción con el segundo principio de la termodinámica), no sería descaminado atribuir a los seres vivos una capacidad cognitiva a nivel celular<sup>222</sup>. En sentido contrario, era preciso conseguir para la biología la precisión de las leyes físicas. La célula comenzó a ser vista como una máquina, con un funcionamiento replicativo próximo a la relojería, hecho que sería comprobado años más tarde. Los neoplatónicos, aún llenos de júbilo por la enunciación del principio de incertidumbre de la física cuántica, volvían a regocijarse ante la certeza de presenciar una nueva identidad, esta vez química y celular, sujeta a un determinismo azaroso. La continuidad y la discontinuidad de los fenómenos naturales, señalada hacía siglos por Heráclito, quedaba reavivada por

esta confluencia de la física con la biología. En definitiva, mecánica cuántica, genetistas y cristalógrafos comenzaron a cimentar las bases del futuro desarrollo de la biología molecular, tal vez la ciencia más representativa de la segunda mitad del siglo XX. La fotografía, a través de las técnicas de difracción de rayos X, electrones y neutrones, de la microscopía óptica y electrónica o de la autorradiografía, tuvo mucho que decir en este espectacular avance.

#### **6.2.7.4. Rosalind Franklin y la fotografía N° 51**

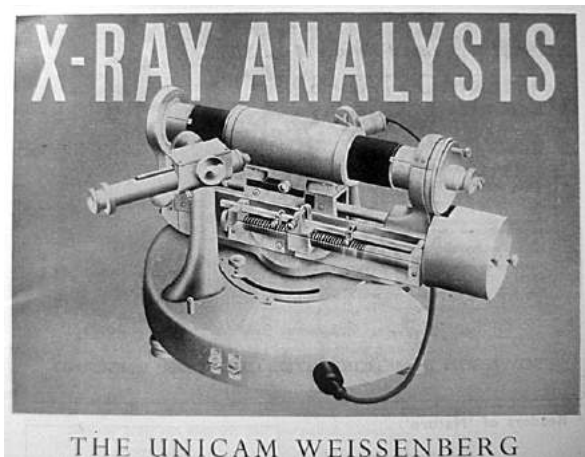
Tras el final de la guerra, cientos de cristalógrafos especializados en la difracción de rayos X, se pasaron al campo de la biología. Entre ellos, se encuentra Rosalind Franklin, una de las figuras científicas más debatidas a raíz de la duda creada en torno a la paternidad del sistema replicativo del ADN. Franklin dedicó muchos años de su carrera a analizar por rayos X distintos tipos de carbón utilizados en combustión y en las máscaras de gas empleadas por los soldados durante la guerra<sup>223</sup>. En 1951, se incorporó a la plantilla de investigadores del King's College de la Universidad de Cambridge, donde fue destinada al estudio de moléculas orgánicas mediante la herramienta que mejor conocía: la difracción de rayos X, siendo ésta su primera experiencia en el campo de la biología.

Por aquellas fechas, esta técnica de análisis cristalográfico gozaba de una gran reputación, respaldada por métodos muy refinados. Sin embargo, los equipos no estaban todavía lo suficientemente integrados. En la mayoría de los casos, los propios investigadores debían construir su propio instrumental a base de ir adquiriendo piezas y utensilios de un lado y otro. Básicamente, se precisaba para su funcionamiento de un tubo generador de rayos X, de un sistema de producción de vacío en el que depositar la muestra o la propia cámara, dado que los rayos X son debilitados a su paso por el aire, y un dispositivo de control de la temperatura en el lugar donde se deposita la muestra para evitar alteraciones durante los periodos largos de exposición fotográfica. Previo al experimento, era muy importante la preparación de las muestras de forma que fueran recientes, y que pudieran ser separadas con limpieza cada una de las fibras antes de ser colocadas en la cámara. A partir de 1950, numerosos científicos, entre ellos Franklin, contaron con muestras preparadas para el análisis. Entre los laboratorios europeos más destacados en estas funciones, destaca el de R. Singer, en Berna, Suiza<sup>224</sup>, que preparaba las muestras con un método de sal y alcohol. La preparación de las muestras terminó siendo una técnica en sí misma dentro del análisis cristalográfico; incluso con varias especialidades, dependiendo si la muestra a analizar presentaba la forma de un cristal simple, de una fibra, como es el caso del ADN, o de polvo, método utilizado mayormente en ciencia de materiales y en química inorgánica.

A principios de los cincuenta, los equipos de difracción comenzaron a ser comercializados en varios formatos y bajo distintas marcas. La mayoría de las veces venían equipados de goniómetro, mecanismo que permite tomar varias fotografías de una misma muestra cambiando con precisión la orientación de la cámara y los ángulos formados por el haz incidente con la muestra (Figuras 6.151. y 6.152). El laboratorio del King's College adquirió en estos años una cámara de alta resolución Philips, finalizando la etapa de utilización de cámaras fotográficas convencionales. Gracias a esta microcámara, Franklin pudo mejorar de forma considerable la resolución y nitidez de las fotografías. Para la producción de rayos X, se comenzó a utilizar los tubos ideados por W. Ehrenberg y W. Spear, que generaban haces muy finos, ideales para la dispersión en los cristales<sup>225</sup>. Aparte, se precisaba obviamente de un laboratorio de fotografía, normalmente ubicado en el mismo centro, y donde se enviaban las películas para ser reveladas. Por aquel



entonces, Freda Ticehurst era la responsable del laboratorio del King's College. Inspirada por experiencias anteriores, Franklin pudo mejorar la resolución de las fotografías al mantener las fibras en condiciones de humedad constante durante todo el período de exposición, a veces de hasta cien horas<sup>226</sup>. En estos primeros años, las fibras se colocaban a unos 15 milímetros de la cámara, y sólo podían ser alienadas con el haz proveniente del tubo de rayos X cuando éste estaba encendido, lo que suponía un gran riesgo para la salud. De hecho, la muerte de esta investigadora a edad temprana suele atribuirse a este contacto próximo y continuado con la radiación.



*Fig. 6.151. Cámara Unicam para difracción de rayos X, con goniómetro. 1952.*

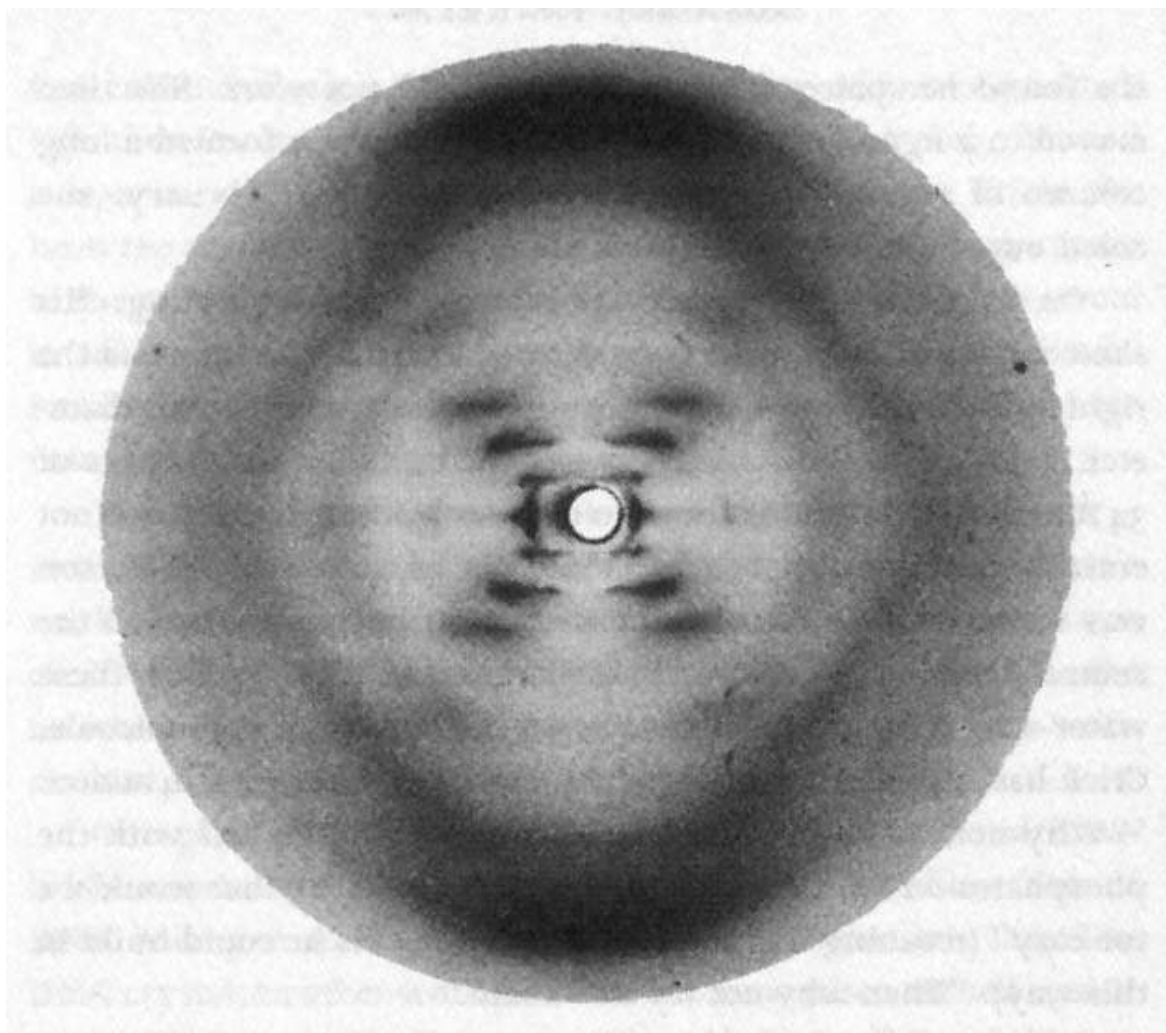


*Fig. 6.152. Equipo para fotografías de difracción de rayos X, con goniómetro. 1951.*

Mientras tanto, el camino por descifrar la estructura interna de las moléculas complejas, constituyentes de las células de los seres vivos, siguió avanzando. En 1949, E. Chargaff, influenciado por el trabajo de Astbury y las teorías de Schrödinger, llamó la atención sobre la correspondencia que existe entre las cuatro bases que conforman el ADN. El número de moléculas presentes en el par de purinas ( adenina y guanina) siempre es igual al par de pirimidinas (timina y citosina). La técnica cromatográfica fue de gran ayuda en este descubrimiento vital para la creación del futuro modelo de Watson-Crick<sup>227</sup>. En 1951, Linus Pauling consiguió desvelar la estructura en hélice (alfa- helix) de las proteínas, descubrimiento que ilustró visualmente con la construcción de un modelo ensamblado con alambres y bolas de madera. El paso siguiente en esta dirección fue determinar la estructura de los ácidos nucleicos, el otro gran componente de las células. Científicos de uno u otro lado del Atlántico fotografiaron con profusión las fibras cristalinas de estos ácidos. La perfección que Franklin consiguió con las fotografías le ayudaron a demostrar a finales de ese mismo año, que el ADN contiene, en realidad, una doble estructura: una cristalina, denominada A, y otra paracristalina B, que sólo sale a relucir cuando las condiciones de humedad de la muestra cambian. Este descubrimiento despejó muchas dudas acumuladas desde los primeros trabajos de Astbury, debido en gran parte a la borrosidad que presentaban las placas como resultado de la superexposición de esta doble estructura<sup>228</sup>. El azar intervino una vez más en ayuda del avance científico; pues, en una ocasión, la fibra se descolgó accidentalmente del portamuestra evitando que cambiara de un estado a otro. Este hecho fortuito proporcionó a Franklin una de las mejores fotografías jamás tomadas de la estructura B: la *fotografía 51*, tal como la denominó su autora. La estructura en espiral de la fibra era más que evidente (Figura 6.153).

Un dato muy relevante acerca de la manera de proceder de Franklin en sus investigaciones y que tiene mucho que ver con la polémica suscitada

posteriormente en torno a la concesión del Nóbel a Watson y Crick y con el tema que nos ocupa de la imagen en la ciencia, es la convicción personal de esta científica por defender el método experimental en ciencia hasta el extremo de hacerle recelar de cualquier forma de simulación de los fenómenos que no estuviera afianzada sólidamente en datos empíricos. Franklin era del parecer que los modelos, como los presentados por Astbury o Pauling, debían ser contruidos una vez determinada su estructura<sup>229</sup>. Su apego a este tipo de convicciones, en cierta medida, le impidieron ver más allá de lo que le mostraban sus fotografías y mapas de densidad electrónica, y a aventurarse a mirar por encima de los hechos



*Fig. 6.153. Fotografía de difracción de rayos X de la estructura B del ADN. “Fotografía 51” de acuerdo a la denominación de Rosalind Franklin. 1953.*

objetivos observados. Esta cautela extrema, elogiada por lo demás en una científica de su talla, marchó en contra del riesgo y de la imaginación que tanto Watson como Crick acometieron al enunciar el sistema replicativo de las bases constituyentes del ADN, hecho merecedor del premio Nóbel. Las palabras de Watson y Crick, referentes al equipo de Franklin y del King’s College son bien esclarecedoras del rumbo que tomaron en su día los acontecimientos.

*Hemos intentado interesarlos en la construcción de modelos plausibles. Sin embargo, hemos desistido temporalmente debido a acuerdos profesionales de no trabajar en los mismos problemas que*

*los colegas cercanos. Sin embargo, si el personal del King's College persiste en no hacer nada, nosotros probaremos suerte.*<sup>230</sup>

*En poco tiempo, ambos grupos del King's College habían obtenido una idea bastante ajustada de la estructura, pero no habían construido modelos apropiados. Esta es la razón principal de que no repararan en el apareamiento de las bases y de haber pasado por alto la importancia de las reglas de Chargaff.*<sup>231</sup>

Hay razones de peso que ponen en evidencia la discriminación generalizada que sufrían las mujeres de la época, no sólo en el ámbito social sino científico; Marie Curie, Luise Meitner, D. C. Hodgkin, Jocelyn Bell y la misma Rosalind Franklin son ejemplos de ello. Pienso, sin embargo, que asistimos a una falsa polémica cuando se pretende hoy día reivindicar lo evidente: el extraordinario papel desempeñado por esta investigadora en uno de los descubrimientos más trascendentes de la ciencia contemporánea; pues lo cuestionable en este caso no es su valía, o el comportamiento oportunista con la que los dos laureados supieron aprovecharse del trabajo previo de numerosos científicos, sino la disputa por adjudicar un premio que en esencia encierra grandes dosis de contradicción con la propia ciencia, fruto siempre de un esfuerzo colectivo. Hay que tener presente que la mitificación de los científicos comenzó en la época a correr paralela a la de tantos otros colectivos, como artistas plásticos, músicos, deportistas o actores hollywoodienses. Las palabras del propio Chargaff al respecto, comparando los éxitos de un Einstein o una Curie en tiempos en los que los medios de comunicación de masas se encontraban aún en un estado embrionario, con los del descubrimiento del ADN, son bien esclarecedores de la nueva dimensión que cobró la ciencia de esos años, a la sombra de grandes proyectos ligados a la *torre de Babel* del poder económico y político.

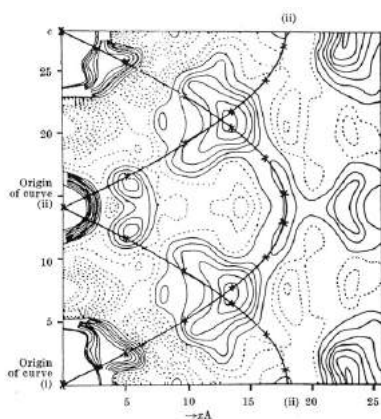
*La ciencia - o al menos la ciencia con la que estoy familiarizado - era pequeña, barata y abierta. Uno podía seguir haciendo experimentos en el sentido tradicional de la palabra. Ahora, todo el mundo trabaja en "proyectos", cuyos resultados se deben conocer con antelación; de otra forma, el exceso de inversión financiera no podría justificarse...*

*Por el contrario, cuando la biología molecular apareció en escena, la maquinaria publicitaria ya estaba lista, justo para que las saturnales comenzaran a todo ritmo...*

*De cualquier forma, el carnaval publicitario que sobrevino a raíz de la revelación del modelo del ADN fue probablemente único en la historia de la ciencia.*<sup>232</sup>

Por su parte, el comentario *paranoico- crítico* de Salvador Dalí, respecto de este descubrimiento, mezcla de cinismo y humor, refleja muy bien el espíritu y sentir de la época.

*Y ahora la noticia de Watson y Crick sobre el ADN. Para mí, esta es la verdadera prueba de la existencia de Dios.*<sup>233</sup>



**Fig. 6.154. Función cilíndrica de Patterson de la forma A de un cristal de sodio dextrirribonucleico mostrando la estructura en doble espiral. R. Franklin, R. E; y Gosling, R. G. 1953.**

Hasta qué punto la imagen analógica aportada por una fotografía, - como la nº 51 de Franklin-, supone el punto de partida de todo conocimiento al respecto, ya sea a partir de los datos encerrados en sí misma, o desde los modelos construidos a partir de sus rasgos mensurables, es de un gran interés epistemológico, pues volvemos a presenciar en la historia de la ciencia la íntima relación que existe entre la imagen técnica, la de síntesis y la imagen mental en el trabajo de los científicos. La aportación de Franklin al descubrimiento del mecanismo replicativo del ADN ha suscitado una viva polémica entre historiadores y científicos, siempre en torno a estas cuestiones. Como señala A. Klug, un colaborador asiduo de Franklin, la científica hizo contribuciones decisivas al respecto: descubrió la forma B, reconoció los dos estados de la molécula y definió las condiciones para su transición mediante funciones de Patterson<sup>234</sup> (Figura 6.154.), desveló también la posición exacta de los fosfatos en el exterior de la molécula y asentó las bases

para el estudio cuantitativo de los patrones de difracción. Es más, tras el hallazgo de Watson-Crick, demostró que la doble espiral era consistente con los patrones de las formas A y B registradas magistralmente en sus fotografías<sup>235</sup>. Todo quedaba en bandeja para el gran salto hacia la explicación del mecanismo de la herencia. A principios de 1953, existían suficientes datos sobre las características del ADN como para poder presentarse un modelo veraz de su estructura y del mecanismo de replicación de los genes. En enero de ese año, el mismo Pauling publicó su versión, defendiendo la existencia de una triple espiral con fosfatos colocados en el centro<sup>236</sup>. La impaciencia, tal vez, de este científico de prestigio ante la proximidad de un descubrimiento que todos sabían que estaba a la vuelta de la esquina, fue la razón de que su modelo fuera fallido. La importancia de las fotografías en este asunto tan vital fue reconocido por Pauling años más tarde.

*No puedo decir que habría pasado si el 26 de noviembre hubiera asumido la otra suposición, la de la doble espiral; o si hubiera tenido acceso a las fotografías de difracción del ADN hechas por Wilkins.*<sup>237</sup>

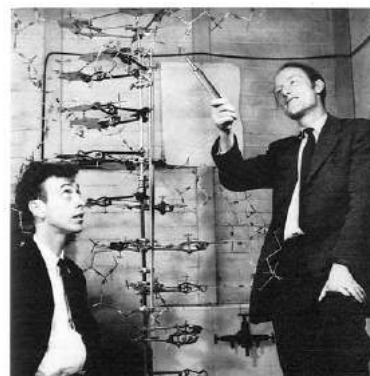
Mientras tanto, Franklin se mantuvo trabajando concienzudamente, sin atreverse a lanzar un modelo que no estuviera respaldado lo suficientemente por datos empíricos, como las fotografías de la forma A en la que trabaja insistentemente, o por el trabajo de medición conducente a los mapas de densidad electrónica. La defensa de que los fosfatos se mantenían en el exterior, siendo los responsables de la hidratación de las fibras, le aportó un nuevo éxito. En febrero, sabía que la estructura estaba formada por una doble espiral, que explicaba la constancia de las bases observadas por Chargaff años antes. Llegó a afirmar que el intercambio de las bases era el responsable de la idiosincrasia del ADN. Estaba a un paso de descubrir el mecanismo de la replicación, cuando Watson y Crick se adelantaron<sup>238</sup>. Estos dos científicos se mantuvieron muy constantes en su trabajo, y muy alertas de los avances en todos los frentes hasta recomponer un rompecabezas cuya clave se encontraba en la fotografía 51. De hecho, la fotografía fue observada por Watson poco antes del descubrimiento. Dos datos adicionales, no contemplados por Franklin hasta entonces, sirvieron para que los dos laureados se atrevieran a presentar su nueva imagen sobre el sistema replicativo: el carácter monoclinico de la fibra cristalina, - ambas cadenas se



muestran en direcciones opuestas-, y el apareamiento de las bases. El modelo fue pronto materializado en la forma de un mecano de alambres y varillas, con el que mostraron al mundo uno de los secretos mejor guardados por la naturaleza: el fenómeno de la continuidad de la vida (Figura 6.155).

*No escapa a nuestra atención que el apareamiento específico que hemos postulado sugiere automáticamente un posible mecanismo de copiado del material genético.*<sup>239</sup>

Fotografías y modelos, imagen técnica e imagen mental situadas en el eje de este imponente descubrimiento. Años más tarde, Watson y Crick fueron sometidos a un continuo cuestionamiento de su proeza - entre otros, por algunos fervientes admiradores de Rosalind-, hasta el punto de ser acusados de comportamiento deshonesto por haber sustraído la famosa fotografía; o de, al menos, haberla visto sin la aprobación de su autora junto a una serie de notas muy reveladoras. Ante tales acusaciones respondieron con algo fundamental para el propósito de este libro, y de gran ayuda para dilucidar hasta qué punto esta dualidad entre imagen e imaginación se encuentra presente en el día a día del esfuerzo de la ciencia por descubrir lo inescrutable.



*Fig. 6.155. Modelo del ADN, presentado por Watson y Crick, 1953.*

*Yo no fui al cajón y la robé, me la enseñaron, y me dieron las dimensiones: una repetición de 34 angstroms; así que, como comprenderá, yo sabía aproximadamente lo que eso significaba; ah, pero la clave del asunto fue la fotografía de Franklin. Eso fue lo que nos movilizó psicológicamente.*<sup>240</sup>

Nuevas palabras de Pauling confirmaron hasta qué punto las fotografías desempeñaron un papel de vital importancia en este descubrimiento.

*En mi opinión, si Watson y Crick no se hubieran mantenido persistentes en su esfuerzo, y no hubieran sido beneficiados por el consejo de Jerry Donohue acerca de las estructuras de las bases de nitrógeno y de las uniones de hidrógeno; y por la información de las excelentes fotografías de difracción de Wilkins, el descubrimiento de la doble espiral, que condujo al gran desarrollo de la biología molecular, se hubiera retrasado unos años.*<sup>241</sup>

Sin embargo, es preciso admitir que Franklin no se atrevió, no supo, o no quiso dar el paso decisivo de lo tangible a lo imaginado, a intuir más allá de lo que le dictaban sus fotografías; en suma, a ver la relación que se establecía entre las dos espirales y el apareamiento sincronizado de las bases. En las fechas próximas a abril de 1953, mes de la publicación del gran descubrimiento en la revista *Nature*, sus notas personales indicaban que no había entendido la relación en detalle de las dos formas<sup>242</sup>. Su determinación era tajante al respecto.

*En el momento actual, no haré ningún intento de introducir hipótesis relativas a los detalles de la estructura.*<sup>243</sup>

Cautela, modestia y un celo excesivo por respetar los pasos establecidos por el método experimental en ciencia no pudieron vencer el ansia de una cultura científica cada vez más orientada al éxito. No está de más recordar en este contexto, comportamientos como el de W. Röntgen, tan lleno de modestia y sencillez, tras el descubrimiento de los rayos X, un verdadero hito en la historia de la ciencia y de la humanidad.

#### **6.2.7.5. Más allá de la fotografía**

Aunque la fotografía de difracción de rayos X llega a resoluciones de varios angströms, situando el nivel de visibilidad próximo a la escala atómica, es necesaria la construcción de modelos que vayan más allá de estos límites. No se debe olvidar sin embargo, que estos modelos son construidos a partir de los datos aportados por las fotografías, concretamente por las distancias y los ángulos formados por sus manchas. Esta doble aproximación al estudio de las moléculas provocó una confrontación de opiniones entre aquellos que se encontraban más familiarizados con el trabajo fotográfico y los más proclives a la utilización de modelos, como fue el caso de los trabajos de Franklin y Watson- Crick, respectivamente. Hasta qué punto la información de las fotografías fue el artífice de desvelar el secreto de la replicación del ADN, o si fue posible gracias a la construcción de modelos, ha sido un tema de reflexión durante décadas.

*Los datos de la difracción especifican con certeza la posición de los fosfatos y de los grupos deoxiribosa y de las bases, pero no proveen directamente información acerca de sus uniones. Para asegurarse si el sentido de las vueltas de la espiral es del derecho o del izquierdo, tienen que ser construidos modelos moleculares con los grupos principales en las posiciones dadas por las intensidades de difracción .<sup>244</sup>*

Como quiera que sea, parece ser cierto que en experiencias científicas de tal índole, se suelen conjugar los tres tipos de imágenes a las que hemos hecho referencia anteriormente: la analógica, la simulada y la mental. Si la primera aporta los datos empíricos, y la segunda va más allá con la ayuda de las herramientas matemáticas, la tercera no puede ser menospreciada, porque en ella toman cuerpo las hipótesis como entidades a mitad de camino entre la reflexión y lo imaginado. Este tipo de simulación, como señala Monod, es la característica más definitoria del cerebro humano.

*Todos los hombres de ciencia han debido, pienso yo, darse cuenta de que su reflexión, a nivel profundo, no es verbal: es una experiencia imaginaria, simulada con la ayuda de formas, de fuerzas, de interacciones que no componen apenas una “imagen” en el sentido visual del término .<sup>245</sup>*

La técnica cristalográfica por difracción de rayos X, electrones o neutrones, ha sabido crear un procedimiento que se sitúa entre la imagen analógica, plasmada en una emulsión o en una pantalla fluorescente, y la imagen propia del intelecto humano. La dificultad de poder registrar la información relativa a las fases de las ondas dispersadas por la estructura atómica de los cristales, ha obligado a los científicos a dar un rodeo que venciera este impedimento, con la creación de un procedimiento de generación de imágenes único en la ciencia. Recordemos que

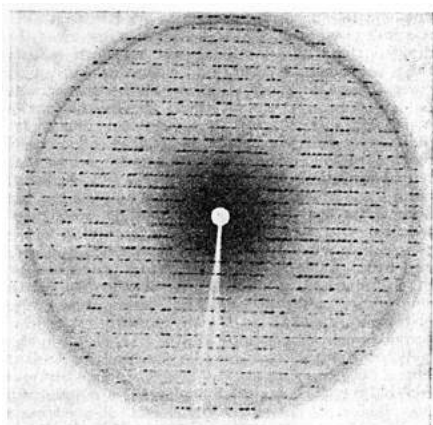
los espectros recogidos por las películas fotográficas nos informan sobre tres características básicas de las ondas que han atravesado la muestra: la amplitud, la longitud de onda y la dirección. En este proceso quedan al descubierto las fases de estas ondas, entendidas como “la cantidad en que cada onda está en discordancia con sus vecinas”<sup>246</sup>. A partir de la información disponible, los cristalógrafos deben imaginar un modelo de estructura del cristal que concuerde con estos datos y que represente de alguna forma las fases desconocidas. La imposibilidad de enfocar los rayos X en un punto del plano de formación de la imagen, obliga que la determinación de las fases se lleve a cabo mediante herramientas matemáticas apropiadas, *función de Patterson* y *series de Fourier* fundamentalmente.

*La expresión de la densidad electrónica en un cristal como una serie de Fourier es el equivalente matemático del proceso de formación de una imagen por ondas de luz en un instrumento óptico*<sup>247</sup>.

La propia Franklin fue instada a utilizar la función de Patterson mediante la medición exhaustiva de las densidades, las distancias y las direcciones entre los puntos recogidos en las placas, y asociando estos datos con los números atómicos involucrados. Con este procedimiento lograría superar el problema de las fases en determinadas estructuras de moléculas, al mostrar los resultados a modo de mapas de contorno. Este tipo de representación es ilustrativo de la densidad electrónica presente en el cristal, desvelando los átomos más pesados con picos más prominentes y facilitando una imagen tridimensional de la molécula (ver Fig. 6.154). A principios de los cincuenta, época en que Franklin llevaba a cabo sus trabajos más decisivos en el estudio de la estructura del ADN, lo habitual era hacer este tipo de operaciones mediante calculadoras, cuadrantes y reglas de cálculo, lo que se traducía en un trabajo arduo y tedioso. La gran dificultad para los científicos era, en realidad, pensar en tres dimensiones, tal como señaló Raymond Gosling, ayudante de Franklin. En alguna ocasión tuvo incluso que encargarse de comprar naranjas para facilitar la visualización de las relaciones espaciales de las múltiples curvas aparecidas en los mapas de Patterson<sup>248</sup>. Los procedimientos para agilizar y mecanizar este tipo de trabajo proliferaron entre los cristalógrafos. El *procedimiento Lipson* fue uno de los más utilizados. Consistía básicamente en el uso de una máscara con orificios horadados por métodos fotolitográficos, con la que se realizaban fotografías que permitían hacer *transformadas de Fourier* de forma casi automática<sup>249</sup>. Sin embargo, los ordenadores comenzaron pronto a entrar en escena para ahorrar trabajo en estas operaciones tan complejas. Otro procedimiento para vencer el problema de la formación de las fases fue mediante la incorporación de átomos pesados en las fibras, un método ideado por Max Perutz en 1953, y que se denominó de *substitución isomórfica*. El método servía para determinar la estructura tridimensional de la molécula a partir de comparar los patrones de rayos X generados con y sin este tipo de átomos. Normalmente, eran utilizados átomos de oro o mercurio por su capacidad para cambiar ligeramente la intensidad de las marcas presentes en las fotografías<sup>250</sup>. Este procedimiento fue básico para determinar las estructuras de la hemoglobina y de la mioglobina, por M. Perutz y J. C. Kendrew, respectivamente<sup>251</sup>; al tiempo que puso de manifiesto que sólo a través de la visión tridimensional de las estructuras era posible seguir avanzando en estos estudios. Es preciso insistir en la idea de que en la década de los cincuenta, cuando los grandes avances en biología molecular tuvieron lugar, las técnicas de generación de modelos y objetos tridimensionales a partir de las fotografías de los cristales y fibras de moléculas eran muy elaboradas, entre otras razones, porque las fotografías de las moléculas de proteínas, en particular, comenzaron a ser extremadamente ricas en detalles relativos a las intensidades y a las posiciones de los distintos rayos difractados (Figura 6.156). En un principio,

las estructuras tenían que ser resueltas por el método de acierto o error, proponiéndose de forma tentativa y provisional un entramado, a la espera de ser confirmado posteriormente con el patrón mostrado por las fotografías.

*...adivinar es ahora más inteligente... Sin embargo, el proceso se mantiene esencialmente por acierto y error. Intentamos varias posiciones para los átomos, como un ladrón que intenta abrir una caja fuerte, y sabemos que hemos acertado porque todo acaba por lo general cayendo en su sitio, y los cientos de puntos de difracción son completamente explicados.*<sup>252</sup>



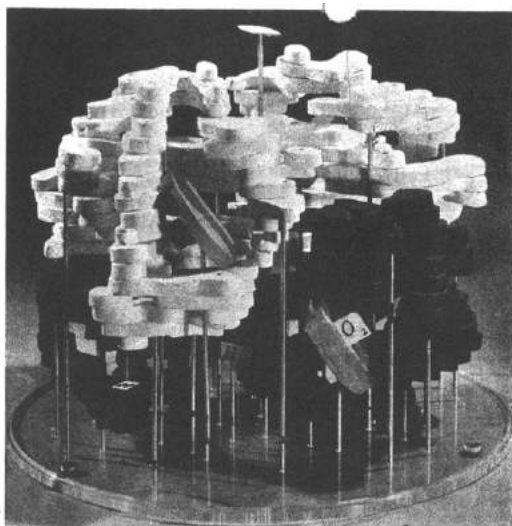
**Fig. 6.156. Fotografía de difracción de rayos X de la mioglobina. J. C. Kendrew. 1954.**

Era necesario comparar patrones de diferentes cristales, cada uno conteniendo átomos pesados en distintos lugares, computar las fases de las distintas reflexiones y aumentar el poder de resolución a partir de analizar más y más reflexiones<sup>253</sup>. Los primeros ordenadores de funcionamiento universal y digital, tales como el Edsac, Edsac Mark 1 y 2, Swac, o el Deuce, fueron utilizados para las operaciones de cálculo, permitiendo la proyección en diferentes planos. Posteriormente, estos planos fueron apilados a la manera de las secciones de órganos utilizadas por los anatomistas en estructuras tridimensionales, representativas de las distintas estructuras y de la densidad electrónica presente en la molécula (Figuras 6.157; y 6.158). Los modelos podían ser representados también bajo la forma tridimensional de un objeto escultórico, con el fin de obtener una imagen particular de una

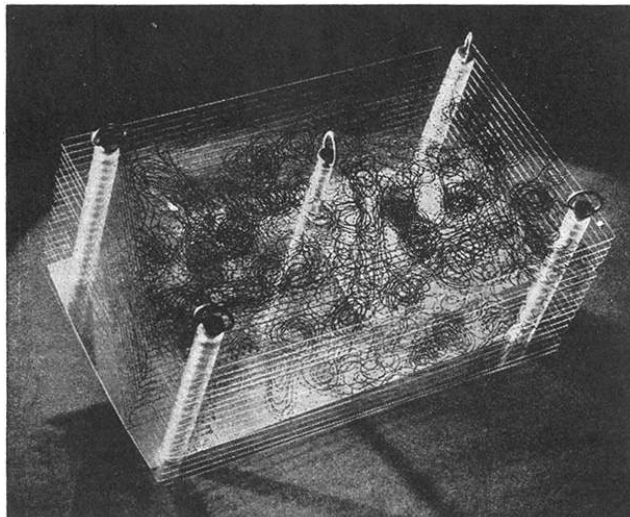
sola molécula aislada de las demás, con la distribución de los átomos pesados que hacían posible resolver el problema de las fases (Figura 6.159). Todas estas operaciones son realizadas en la actualidad de forma casi automática con la ayuda de sensores de estado sólido, sustitutivos de las películas fotográficas, y ordenadores más compactos y potentes (Figura 6.160). Es preciso señalar, que el objetivo fundamental de estas técnicas sigue siendo conseguir niveles de resolución próximos a la unidad atómica, que permitan la generación de mapas de densidad electrónica más fidedignos de la realidad interna de las moléculas.

Un aspecto a resaltar en estas discusiones es hasta qué punto es la visibilidad de los fenómenos la que marca el curso de las investigaciones, o lo es el progreso que se establece a nivel conceptual. Se da el ejemplo de científicos que han preferido contemplar el avance de estas disciplinas en términos de observación. Ha sido el caso de Darlington<sup>254</sup>, al querer centrar el eje de las discusiones sobre las unidades más representativas de la biología molecular -especialmente del cromosoma-, sobre una conceptualización derivada de la micra, el angström o la visión ocular. O el de Kendrew, al basar la descripción de las proteínas en tres niveles estructurales ligados a la capacidad de análisis y de observación: la *estructura primaria*, relativa al orden de los residuos de aminoácidos a lo largo de las cadenas polipeptídicas, revelada por procedimientos químicos; la *estructura secundaria* de los plegamientos, espirales o dobleces de estas cadenas, como la espiral  $\alpha$ , dada a conocer por la difracción de rayos X; y la *estructura terciaria*, que hace mención a la visión tridimensional de las proteínas, como resultado de los modelos establecidos a partir de esta última técnica<sup>255</sup>.



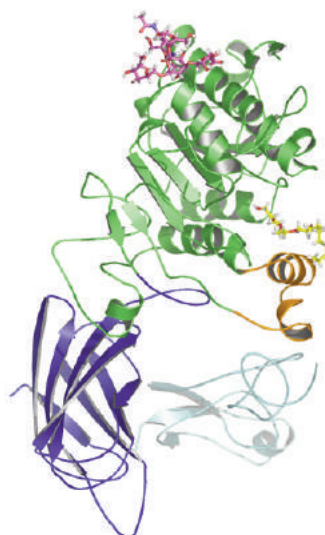


**Fig. 6.157.** Modelo tridimensional de la molécula de la hemoglobina. Perutz, M, F; y otros. 1960.



**Fig. 6.158.** Modelo a partir de los mapas de densidad electrónica de una unidad celular de la mioglobina. Kendrew, J. C. 1958.

**Fig. 6.159.** Modelos de la molécula de la mioglobina. Kendrew, J. C; y otros. 1960.



**Fig. 6.160.** Imagen de síntesis de la lipasa pancreática. CSIC. 2003

El camino de profundización en la observación de las estructuras cristalinas ha seguido desde entonces varias rutas. Por un lado, los intentos por mejorar la resolución y la nitidez de las fotografías fueron continuados a lo largo de los años con aciertos notables como el de J. T. Finch y A. Klug, al mantener los cristales a bajas temperaturas durante periodos de exposición de más de veinte horas, técnica con la que lograron desvelar en 1959 la estructura del virus de la poliomielitis<sup>256</sup>. También con la producción de *fotografías oscilatorias*, hechas con películas depositadas sobre superficies cilíndricas. Por otro, el uso de ordenadores ha llegado a ser imprescindible en las tareas de cálculo, especialmente de estructuras tan complejas como las de proteínas, virus o vitaminas, y en las labores actuales de procesamiento digital de la imagen y de la información. En este

contexto, cabe destacar la labor precursora de D. Hodgkin y colaboradores en la determinación, en 1955, de la estructura de la vitamina B12, para lo que se sirvieron del ordenador Swac<sup>257</sup>. Por último, han surgido nuevas propuestas de extender los métodos cristalográficos al estudio de los líquidos, avaladas por científicos de la talla de J. D. Bernal<sup>258</sup>. En este caso, un camino alternativo al uso de los rayos X quedó abierto con la posibilidad de producir patrones de difracción por medio de haces de electrones y de neutrones.

Si la interacción de los rayos X con los cristales se debe a una dispersión de los haces provocada por las nubes de electrones alrededor de los núcleos, en el caso de la difracción de electrones, son los haces creados en el microscopio electrónico (TEM), de longitudes de onda menores que las de rayos X, los que forman una imagen como resultado de su interacción electromagnética tanto con el núcleo como con los propios electrones de los átomos presentes en la muestra. Por su parte, en la difracción de neutrones se pone en juego la dispersión que sufren los haces formados por estas partículas neutras con las fuerzas intensas del núcleo atómico. La información que obtenemos en un caso y otro cambia. Con los rayos X llegamos a conocer la densidad electrónica a partir de las direcciones de los haces y sus intensidades, con los neutrones conocemos la estructura atómica a partir del poder de dispersión del núcleo, mientras que con los electrones se consigue una imagen de la distribución de potenciales, en este caso, como resultado de poder llevar a foco el haz utilizado. Es digno de resaltar en este contexto que para conseguir efectos fotográficos a partir de haces de neutrones es preciso utilizar un proceso intermedio, dada la escasa respuesta de las emulsiones a este tipo de partículas. Por lo general, el efecto se consigue añadiendo a la emulsión átomos sensibles a la luz, como boro, litio o nitrógeno, o colocando láminas de un material fluorescente junto a la película fotográfica<sup>259</sup>. La tendencia actual es la de conseguir descifrar estructuras de moléculas mediante la utilización de estas técnicas y de otras complementarias como la resonancia magnética, la microscopía electrónica o la espectroscopía de IR. A su vez, el avance en la tecnología de generación de pulsos ha abierto las puertas a la cristalografía de cuatro dimensiones, caracterizada por la generación de espectros en tiempos de pico/femto segundos. La observación de lo remoto y de lo minúsculo se completa, y entran a su vez en una nueva dimensión, gracias al análisis del movimiento, que se hace posible nuevamente, gracias a la imagen.

### 6.3. La imagen del movimiento

*La oposición entre la disminución y la aceleración en el tiempo es análoga a aquella que existe entre el aumento y la reducción en el espacio .<sup>260</sup>*

Ernst Mach.

El movimiento de la naturaleza es consustancial a la fotografía. La captación de un momento preciso del devenir de un objeto, de una secuencia de su comportamiento, o de los cambios producidos en su morfología o estructura a lo largo del tiempo, y su reproducción en un medio visible son cualidades propias de la fotografía. La fotografía es en esencia un registro permanente de una parte infinitesimal del movimiento de los seres naturales. La fijación de las luces y las sombras de lo que nos rodea es, de hecho, lo que define el fenómeno fotográfico. Fotografía y movimiento son inseparables, pues la imagen no deja de ser un reflejo cristalizado de lo natural, que siempre se mueve. Desde tiempos remotos, se sabe

que lo existente es movimiento, que nada existe fuera de él. El tiempo y el espacio son abstracciones que nacen de nuestra mirada hacia este dinamismo inherente a la naturaleza. El estudio del movimiento es, en sí mismo, el estudio de todo lo que es. De aquí, que la idea que tenemos del movimiento de las cosas haya sufrido tantas transformaciones como cambios ha experimentado nuestro conocimiento del mundo que nos rodea. El registro fotográfico del movimiento cubre, por tanto, una etapa de este estudio de lo natural, y como toda herramienta y método de análisis ha experimentado una continua evolución a lo largo de los años de su existencia. El concepto de *fotografía del movimiento* ha ido cambiando durante estos dos últimos siglos a la par que los avances tecnológicos<sup>261</sup>. Los conceptos de *fotografía instantánea*, o de *cronofotografía*, propios del siglo XIX, han dado paso a los de *fotografía de destellos*, de *luz de flash* (spark y flash photography), de *fotografía y cinematografía de alta velocidad*, *fotografía ultrarrápida* (Ultra High-Speed Photography), de *lapsus de tiempo*, o de *resolución temporal*, aparecidos a lo largo del siglo pasado. En la actualidad, el concepto generalizador de *imagen de alta velocidad* resulta más apropiado para aglutinar el conjunto de tecnologías, tanto fotográficas (fija y en movimiento), como de vídeo, dedicadas al registro de imágenes relativas a fenómenos y objetos fugaces. No obstante, este capítulo es titulado *imagen del movimiento* porque su contenido se extiende a los estudios científicos de los fenómenos naturales en todo su espectro móvil, desde los de alta velocidad a los que se producen en periodos de tiempo muy dilatados. En ambos, la imagen tecnológica desempeña un papel de primer orden.

### 6.3.1. La cronofotografía y el concepto de instantaneidad

Una vez pasada la primera época experimental de la fotografía, caracterizada por la búsqueda de formas de reproducción iconográficas prácticas y útiles en la línea de continuidad del grabado, comenzó a comprenderse el gran potencial que tenía el nuevo invento para la captación de los objetos en movimiento. Las primeras técnicas, aún sin depurar, y la escasa sensibilidad de las amalgamas ante la luz, pusieron de manifiesto efectos fotográficos de borrosidad, de desplazamiento, o de superposición, producidos por aquellos objetos con velocidades por encima de la capacidad de los obturadores empleados. Este *defecto* abrió una nueva puerta a la experimentación prácticamente desde los primeros años del daguerrotipo y el calotipo. En 1851, Talbot hizo una de las primeras fotografías *instantáneas*, utilizando la luz producida por el destello proveniente de una máquina de Wimshurst<sup>262</sup>. La imagen, a modo de ráfaga, es la de un periódico rotando velozmente en un soporte giratorio. Pero fue tal vez la fórmula del retrato, la que pronto exigió una mayor celeridad en los tiempos de exposición del material fotográfico. La rigidez y quietud exigidas a los modelos, o los procedimientos engorrosos e incómodos ideados para evitar esta borrosidad de las imágenes se convirtieron en serios impedimentos para un negocio que comenzaba a mostrarse muy próspero. Ejemplos de ello, fueron los soportes metálicos, casi ortopédicos, que se aplicaban a los modelos para ayudarles a mostrarse erguidos y quietos (ver Figura 2.91); o técnicas tan molestas como embadurnar con harina la cara de los clientes y someterlos a exposiciones de cerca de media hora al sol para paliar la escasa sensibilidad de las emulsiones<sup>263</sup>. La fotografía de paisajes urbanos puso también en evidencia la incapacidad de las primeras técnicas para captar el ritmo acelerado de las nuevas ciudades. Los viandantes y los primeros tranvías y automóviles aparecían difuminados, poniendo de manifiesto la deficiencia del nuevo medio por encima de un efecto de plasticidad reivindicado años más tarde por la fotografía pictorialista. En este contexto, es digno de resaltar los trabajos de Oliver. W. Holmes, un médico que utilizó este tipo de fotografía urbana para estudiar las posiciones naturales de los viandantes con el fin de diseñar prótesis ortopédicas para los numerosos lisiados que había causado la Guerra Civil de Estados Unidos<sup>264</sup>.



Fig. 6.161. Efecto de la luz en rueda dentada diseñada por Fizeau en 1849, con objeto de medir la velocidad de la luz.

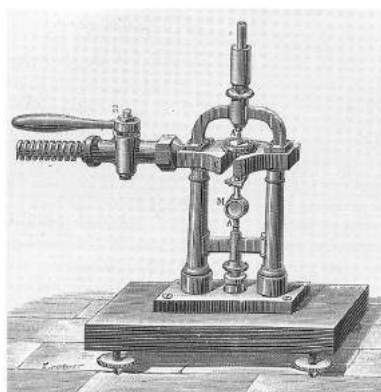
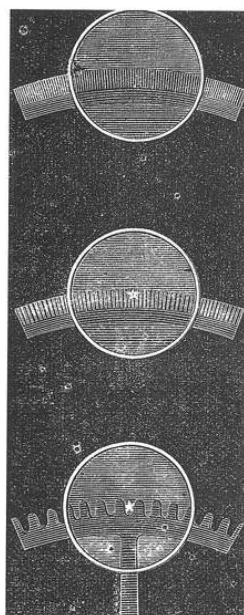


Fig. 6.162. Dispositivo de Foucault para determinar la velocidad de la luz, mediante un espejo que hace girar una turbina de aire 1850.

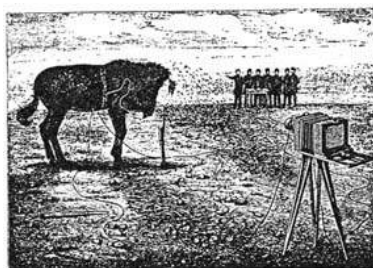
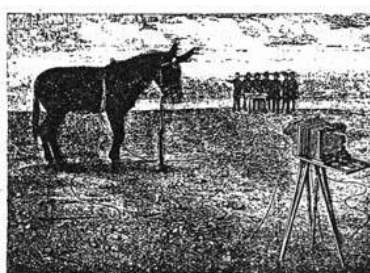
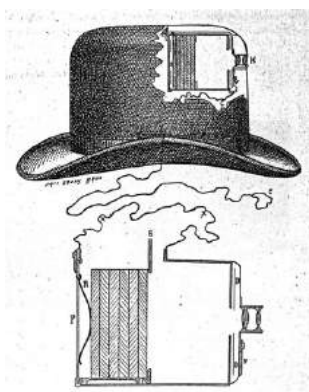


Fig. 6.163. Ensayos de balística.

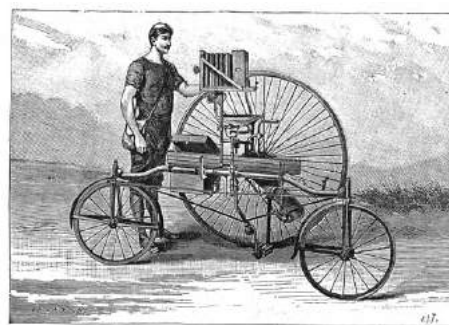
Debemos destacar en este contexto, la obra de J. M. Eder, *La Photographie Instantanéé: son application aux arts et aux sciences*<sup>265</sup>, de 1888, bien ilustrativa de cómo el concepto de movimiento, tanto en la ciencia como en el arte, se vio afectado por la aparición de la fotografía. Es sintomático que los estudios clásicos sobre la velocidad de la luz de H. L. Fizeau y de L. Foucault se produjeran de forma coetánea con la entrada de la fotografía en la escena científica y social, o que fueran realizados por dos grandes estudiosos y amantes de la técnica fotográfica. Si el primero empleó los valores máximos y mínimos de la intensidad de la luz para determinar su velocidad, el segundo lo hizo en base al desplazamiento de las imágenes<sup>266</sup> (Figuras 6.161 y 6.162). En poco tiempo, la fotografía de los procesos en movimiento abrió vías de estudio nunca imaginadas, en ramas tan diversas como la fisiología, la balística, la astronomía, o la incipiente ciencia del electromagnetismo. Recordemos al respecto los estudios electrográficos y electrofotográficos de los pulsos y las constantes vitales, los primeros ensayos de captación de los impactos producidos por proyectiles (Figura 6.163), la fotografía de eclipses y del paso de los planetas, o las de descargas arborescentes producidas por fenómenos eléctricos naturales y artificiales (ver Cap. 2.6.3. y 2.7.1.). Es preciso insistir en que la simple captación de un gesto, de la acción de un individuo o de un grupo de personas en un escenario natural, algo que para nuestros ojos actuales no supone ningún motivo de admiración o sorpresa, llamó poderosamente la atención del conjunto de la sociedad de la segunda mitad del XIX. Para hacernos una idea de la transformación experimentada por el concepto de instantánea a lo largo de estos años, basta señalar que se consideraban imágenes de este tipo las capturadas de forma sigilosa por el fotógrafo, ayudado a veces de sistemas tan pintorescos como el *foto- sombrero*, de M. J. de Neck<sup>267</sup> (Figura 6.164).; o por el ya comentado *revolver fotográfico* de M. Enjalbert (ver Cap. 2.8.1. y Figura 2. 93). La experimentación insistente en el análisis del movimiento de los objetos llevó a los investigadores a otorgar un papel más activo a la forma de captación de lo fugaz, poniéndose a prueba técnicas que hicieran posible el acompañamiento del objeto móvil por la cámara, liberándola del punto de vista exclusivo y quieto. Las primeras fórmulas propuestas de *travelling fotográfico*, con la ayuda de los medios mecánicos disponibles entonces como monociclos y triciclos, nos ayudan a comprender el momento histórico que experimentaba la imagen como herramienta de estudio de lo dinámico (Figuras 6.165 y 6.166).





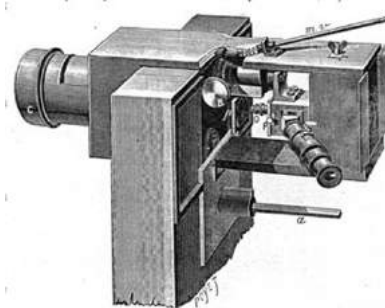
**Fig. 6.164. Fotosombrero, de M. J. de Neck.**

**Fig. 6.165. Cámara oscura adosada a un monociclo. c.a. 1880.**



**Fig. 6.166. Cámara oscura adosada a un triciclo. c.a. 1880**

Si en el ámbito del arte, la representación del movimiento sufrió una profunda transformación a resultas del advenimiento de la fotografía, en el científico supuso una fuente inagotable de estudio, dando lugar a una nueva disciplina bautizada con el nombre de cronofotografía. El análisis del movimiento a través de la fotografía comenzó a constituir una técnica especializada, ayudada por la producción de una serie de mecanismos y dispositivos, preferentemente de iluminación y de obturación. Ni que decir tiene que la astronomía y las ciencias dependientes de la microscopía se vieron ampliamente beneficiadas por esta nueva vía de trabajo. Las primeras imágenes secuenciales del movimiento de microorganismos no se hicieron esperar, así como de la formación de los eclipses, donde cabe destacar las fotografías tomadas en una misma placa en 1854, por William y Frederick Langesheim en Filadelfia<sup>268</sup>. La técnica fue depurándose hasta posibilitar la toma en serie del tránsito de los planetas. Tal fue el caso de Venus, fotografiado en 1874 por M. Janssen; o el de las primeras fotografías en serie del sol, trabajos que suscitaron un gran interés en la comunidad científica a la vez que se convirtieron en un claro y directo antecedente del cinematógrafo (Figuras 6.167 y 6.168). En el campo de la meteorología se produjeron también secuencias de imágenes de fenómenos atmosféricos como auroras boreales, tormentas, o formación de nubes<sup>269</sup>, donde cabe destacar las realizadas por E. Muybridge<sup>270</sup> (Fig. Muybridge

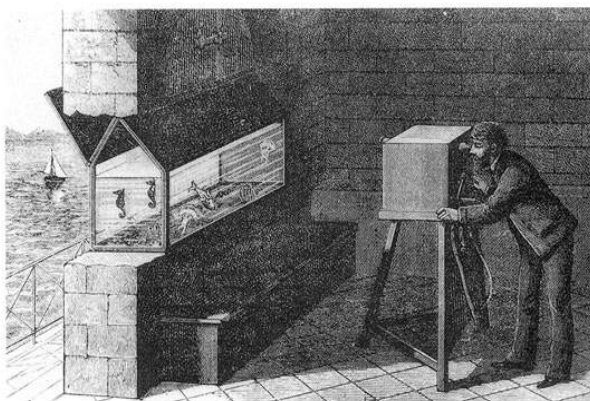


**Fig. 6.167. Dispositivo para fotomicrografía móvil. R. Koehler. 1892.**



**Fig. 6.168. Imagen positiva obtenida por M. Janssen del Pasaje de Venus por el Sol, el 8/12/1874. (grabado)**

Nubes). Si la fotografía había favorecido la observación de los fenómenos invisibles en los ámbitos de lo remoto y lo diminuto, ahora lo hacía extendiéndose a la fugacidad de los cuerpos. Se despertó el prurito por conocer el comportamiento de los objetos en esa franja infinitesimal del tiempo, oculta a nuestros ojos. Por entresacar algunos ejemplos destacados de la época, decir que el mismo Muybridge captó el trote de los caballos o el andar de los minusválidos; que E. J. Marey hizo lo mismo con la caída y la dinámica de todo tipo de objetos, incluido el movimiento de los hipocampos (Figura 6.169); que E. Mach capturó el devenir de las ondas sonoras y de los proyectiles con la ayuda de los destellos eléctricos; J. M. Charcot, las emociones y el sueño de los



**Fig. 6.169.** Marey fotografía unos hipocampos. *La Natura*, 1890.

enajenados con cámaras en registro permanente que tanto recuerdan los actuales sistemas de videovigilancia; o que O. Anschütz, registró el vuelo fugaz de las cigüeñas, y el desplazamiento de grupos humanos.

A nivel técnico, esta persecución de lo instantáneo potenció el desarrollo de nuevos sistemas de obturación para las cámaras y de nuevas fuentes de iluminación más allá de la luz natural, estableciendo los dos procedimientos básicos con que la fotografía consigue detener el movimiento fugaz de los objetos. Los dispositivos manuales y mecánicos,

o la luz solar, hasta entonces imperantes en los laboratorios, fueron substituidos paulatinamente por los dispositivos electromagnéticos (Figura 6.170). A un mismo tiempo, la sensibilidad de las emulsiones mejoró ostensiblemente hasta conseguirse los niveles aportados por la gelatina en seco al bromuro de plata, amalgama que proporcionó una mayoría de edad a los procedimientos fotográficos. Es interesante recordar cómo la fotografía fue reduciendo los tiempos de exposición durante el siglo XIX en consonancia con los nuevos materiales fotosensibles manufacturados (Cuadro nº 10)<sup>271</sup>.

Grabado al asfalto (Niepce)	1827	6 horas
Daguerrotipo con yoduro de plata	1839	30 minutos
Calotipo revelado con ácido gálico	1841	30 minutos
Colodión húmedo	1851	3 minutos
Colodión de bromuro de plata	1864	15 segundos
Gelatina al bromuro de plata	1878	1/200 segundos
Gelatina al bromuro de plata	1900	1/1000

**Cuadro nº 10**

Este desarrollo tecnológico en el campo de la cronofotografía consiguió cubrir una de las aspiraciones más anheladas por la sociedad decimonónica: la de lograr la representación de los hechos tal como se producen en la vida real mediante un mecanismo que produjera la ilusión del movimiento. La llegada del cinematógrafo, como parte del desarrollo natural de la cronofotografía, cerró un ciclo histórico cuyos inicios se retrotraen a la linterna mágica, los dioramas, los cantadores públicos, los cosmoramas, los zootropos, el bioscopio, y tantos otros artilugios destinados a reproducir los hechos reales e imaginarios de la vida (Figura 6.171). En el ámbito científico, las fronteras entre la fotografía y el cinematógrafo quedan enormemente diluidas por el hecho de que el foco de atención de la ciencia se

centra en el análisis de cada una de las imágenes por encima del efecto de ilusión que la proyección en cadena de una secuencia de ellas provoca en nuestras mentes. La cinematografía en ciencia está referida fundamentalmente al registro de un determinado número de fotogramas por unidad de tiempo, como una técnica más destinada a fragmentar el movimiento de los cuerpos. En este sentido, no deja de ser una parcela más de las técnicas de obturación fotográfica junto a los distintos disparadores e integradores temporales existentes. Estos últimos conforman, junto con las técnicas de iluminación disponibles, las dos vías fundamentales del control de la exposición del material foto y videográfico. Tiempo e intensidad de la energía radiante son los factores determinantes de las leyes de la sensitometría que, en el caso de la imagen de los fenómenos fugaces, adquieren unas connotaciones muy particulares. La observación y el registro iconográfico de un cuerpo irradiante en un momento determinado, están referidos indefectiblemente al movimiento de otro objeto que sirve de referencia, parangón que conviene en llamarse *tiempo*. Energía radiante y movimiento son conceptos que se encuentran en la base de todo proceso de adquisición y producción de imágenes.

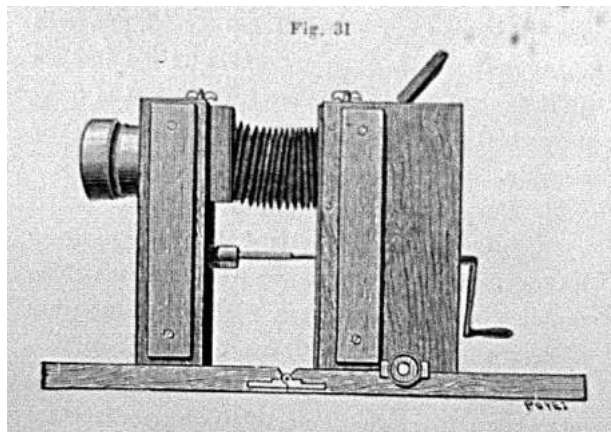


Fig. 6.170. Dispositivo para película. R. Koehler 1892.



Fig. 6.171. Cantadores Ilustración ibérica, 1887. Cuadro de Alfredo Cluysenar.

En este contexto, las fuentes de energía y los diferentes dispositivos tecnológicos creados a partir del control de los fenómenos electromagnéticos, tanto naturales como artificiales, han afectado de lleno a las técnicas de visualización de los fenómenos en el tiempo. Si la presencia de los procesos derivados del electromagnetismo ha sido crucial en las dos aplicaciones científicas de la fotografía estudiadas hasta el momento: la del universo astronómico y el diminuto, su actuación en el ámbito de la imagen de los cuerpos veloces, digamos que ha sido indispensable. Tanto los sistemas de obturación como los de iluminación utilizados para estos fines se deben en gran medida a procesos y dispositivos creados dentro de esta ciencia. Es más, el propio electromagnetismo se ha visto ampliamente beneficiado por el desarrollo de la imagen de alta velocidad, por ser sus fenómenos un foco de atención constante de este tipo de estudios. Figuras de Lichtenberg y descargas eléctricas en diversos medios y condiciones<sup>272</sup> han sido registradas regularmente por técnicas fotográficas y cinematográficas de forma autosuficiente, o en conjunción con osciloscopios, centelleadores o procedimientos electrofotográficos<sup>273</sup>.



### 6.3.2. La electricidad en la imagen del movimiento

*No hay espacio ni tiempo a priori; a cada momento, a cada grado de perfeccionamiento de nuestras teorías del mundo físico corresponde una concepción del espacio y del tiempo. El mecanicismo implicaba la concepción antigua; el electromagnetismo exige una nueva de la que nada nos permite decir que será definitiva.*<sup>274</sup>

Paul Langevin

El dinamismo inherente a los fenómenos electromagnéticos convierte sus productos en piezas óptimas para ser utilizadas en el registro del movimiento de los objetos. Es preciso insistir al respecto que toda imagen fotográfica o videográfica es *sensu strictu* una representación del movimiento de los cuerpos, independientemente de si la apariencia del mismo es, ante nuestros ojos, de completa estabilidad o de una extrema fugacidad. Toda imagen técnica, sea o no de alta velocidad, es siempre una fijación de un momento concreto del devenir inagotable de los fenómenos. Es más, esta movilidad y este continuo cambio de lo existente afecta al mismo producto iconográfico - película, placa, papel, pantalla, o soporte magnético-, siempre sujeto a las continuas mutaciones y transformaciones que le proporciona el paso del tiempo. De aquí, que la delimitación existente entre una imagen convencional y otra catalogada como imagen del movimiento, fotografía de alta velocidad, o cronofotografía, guarde siempre cierto grado de imprecisión. Debemos reconocer, por ejemplo, que una fotografía del trazado de una partícula atómica, de una figura luminosa de un osciloscopio, cualquier fotograma de una película, e incluso un retrato o un paisaje, son siempre registros de lo móvil. El criterio más plausible sería, por tanto, establecer las lindes entre ambos tipos de imágenes en función de la importancia que el movimiento del objeto tiene en sí mismo para el estudio científico, independientemente de la mayor o menor velocidad de que disponga. No olvidemos que el interés de la ciencia por el movimiento de los cuerpos afecta por igual a los fenómenos de alta velocidad como a los que se producen en periodos muy extensos de tiempo. Si los primeros han ocupado tradicionalmente el centro de interés de la ciencia, favorecidos por el empuje de la industria en su conjunto, y más en particular por el sector del armamento y de la aeronáutica, y respaldados por el desarrollo de técnicas de visualización de vanguardia; los segundos cobran protagonismo por días, una vez que la investigación de este tipo de fenómenos crece, a medida que el bagaje documental de la imagen tecnológica está próxima a cumplir doscientos años, proporcionando un archivo histórico de piezas indispensable para las labores de seguimiento y análisis comparativos de los hechos.

La presencia de los fenómenos electromagnéticos en la creación de imágenes relativas al movimiento de los objetos es prácticamente desde los orígenes de las investigaciones en electricidad (ver Cap. 2.5). Los primeros resultados, materializados en imágenes, diagramas y gráficos, se deben tanto a los procedimientos electrográficos como electrofotográficos. Si en los primeros, los procesos electromagnéticos son capaces de generar por sí mismos gráficos e imágenes representativas del movimiento de los objetos; en los segundos, fue la fotografía la que se encargó de plasmar sus resultados. Al tiempo que se producían estos trabajos, la técnica fotográfica comenzó a hacer uso de los dispositivos eléctricos para ampliar el ámbito de sus posibilidades, entre ellas, la del registro del movimiento fugaz de los objetos. Los primeros estudios electrofotográficos aplicados a los procesos fisiológicos se atribuyen a J. N. Czermack, quien presentó



en 1863 un proyecto para registrar fotográficamente el pulso cardíaco. La materialización de esta idea la consiguió E. Stein con la utilización de un artilugio mecánico, denominado *esfigmógrafo*, sensible al pulso de la arteria y capaz de reproducir su acción sobre un papel sensibilizado<sup>275</sup> (ver Capítulo 2.7.1). Pronto, la electrofotografía se extendió al estudio de una serie de constantes vitales, como la respiración, la contracción de músculos o la variación de la temperatura en el cuerpo. La confluencia de medios electrográficos y fotográficos para el estudio del movimiento tuvo su gran representante en la figura de E. J. Marey. Este investigador incansable ideó toda suerte de artilugios para lograr una representación gráfica y sintetizada de movimientos tan diversos como los pasos del caballo (Ver Figura 2.61), el desplazamiento de vehículos mediante un dispositivo denominado *odógrafo*, que permitía ver a simple vista el recorrido y los percances ocurridos en recorridos de hasta 20 kilómetros; el ritmo cardíaco y la presión sanguínea con una variedad del esfigmógrafo (ver Fig. 2.62), o el movimiento producido por la fuerza de un caballo al tirar de un carruaje. Posteriormente, y ayudado de la fotografía, consiguió extender este tipo de estudios a toda clase de movimiento de objetos inanimados y seres vivos, dejando un legado único para la historia de este medio<sup>276</sup>.

Uno de los mecanismos eléctricos que permitió la fabricación de gran parte de estos ingenios fue el electroimán, cuyas características generales han sido expuestas con anterioridad (ver cap. 2.5; y Figura 2. 12). Su función como relé, aprovechada con notable éxito por la telegrafía eléctrica y el teléfono, fue rápidamente aplicada a los nuevos obturadores de las cámaras fotográficas. El uso de este tipo de relés potenció, junto con los conmutadores y circuitos eléctricos, la fabricación de disparadores automáticos, de mecanismos de exposición en serie, o de dispositivos de relojería aplicados a los obturadores. A su vez, la generación de nuevas fuentes de iluminación eléctrica, especialmente la de arco eléctrico, potenció la entrada de la fotografía en el ámbito de los fenómenos de alta velocidad. Las primeras experiencias al respecto se deben a August Toepler, creador en 1864 del método de la *fotografía de estrías*, conocido también en los ambiente científicos como *fotografía schlieren*<sup>277</sup>. Para ello, se basó en las investigaciones que Foucault había llevado a cabo en 1859 sobre los efectos producidos por la luz en los espejos cóncavos de los telescopios, hecho que había sido señalado, a su vez, siglos antes por Huygens<sup>278</sup>. Estas observaciones fueron aprovechadas por A. Toepler para idear un procedimiento fotográfico de gran aplicación en el ámbito de la imagen de alta velocidad. El esquema consistió en producir un destello mediante un arco eléctrico y dirigirlo hacia el objeto de estudio - originalmente el humo o columna de aire desprendido por un mechero Bunsen- haciendo llegar a la cámara fotográfica el haz saliente, no sin antes haber incidido sobre un *filo* o *cuña cortante* (knife- edge), responsable de la formación de las estrías<sup>279</sup>. Este procedimiento lo pusieron en práctica E. Mach y el mismo Toepler para el estudio de las ondas sonoras en medios gaseosos. Con el tiempo, se aplicó al análisis de la formación de ondas y de los cambios en la tensión superficial de líquidos<sup>280</sup>, al estudio de las variaciones producidas en las superficies de los sólidos<sup>281</sup>, y a las producidas en líquidos por la acción de campos eléctricos<sup>282</sup>. En 1934, H. Schardin realizó las primeras fotografías estriadas en color, a pesar de la dificultad de esta técnica para producir imágenes de este tipo dado la gran pérdida de luminosidad que ocasiona el uso de las pantallas cortantes<sup>283</sup>.

En 1880, V. Dvorak ideó un nuevo procedimiento para el registro de objetos fugaces, conocido por *fotografía de sombras*, que en líneas generales obedece a los mismos principios expuestos con anterioridad en el capítulo dedicado a la microscopía de sombras. (ver cap. 6.2.3.) En este caso, se comenzó proyectando un destello de luz producido por un arco eléctrico sobre el objeto, de manera que su imagen, en forma de silueta, fuera recogida por la placa fotográfica. Esta técnica tan simple ofreció unos resultados muy llamativos en la época, especialmente, con

la imagen de proyectiles en vuelo y del impacto de gotas sobre líquidos. En este contexto, destacan los trabajos que Mach llevó a cabo entre 1881 y 1887. Nuevas experiencias en esta dirección fueron sucediéndose, entre las que hay que destacar las de Lucien Bull, discípulo de Marey, que consiguió efectuar destellos de luz a razón de 2.000 por segundo; o las realizadas por W. Rayleigh a partir de 1890, haciendo coincidir el destello luminoso procedente de una bobina de inducción con la caída de una gota de agua en un tiempo menor a la cienmilésima parte de un segundo. En 1893, nuevamente Mach, en colaboración con C. V. Boys, aplicó la técnica de sombras al estudio de la compresión experimentada por las ondas de aire ante la proximidad del paso de proyectiles. Para principios del nuevo siglo, las velocidades de exposición se acercaban a la tresmillonésima parte del segundo, especialmente en pruebas de lanzamiento de gotas y objetos en medios líquidos<sup>284</sup>. En el caso de los proyectiles, el método de Mach fue perfeccionándose con la ayuda de condensadores capaces de producir fuertes descargas de golpe y simultáneas al fenómeno observado. En este tipo de experiencias, la propia onda expansiva del proyectil al salir de la boca del arma, era la responsable de activar un interruptor que a su vez ponía en funcionamiento el circuito disparador; o a veces, era la propia bala la que iba cortando una serie de hilos interpuestos en su camino, activando así las descargas. Los trabajos más significativos en esta dirección son los de M. A. Worthington, recogidos en su obra de 1908: *A study of Splashes*, tan decisiva en la creación de la cámara de niebla (ver Cap. 3.5.; y Figura 3.14.); los de C. V. Boys, de 1915<sup>285</sup>, con los que obtuvo destellos cercanos a la diezmillonésima parte de un segundo; y los de P. P. Quayle, llevados a cabo en 1925 (Figuras. 6.172; 6.173, y 6.174).

La entrada del siglo XX en este tipo de técnicas se caracteriza por la aplicación generalizada de una serie de avances tecnológicos en el análisis del movimiento, entre los que cabe destacar el cinematógrafo, cada vez más perfeccionado, las células fotoeléctricas, las válvulas termoiónicas y los primeros tubos de imagen, particularmente el osciloscopio y el iconoscopio. Que duda cabe que la industria cinematográfica potenció el desarrollo de la técnica fotográfica en su conjunto, preferentemente a través de la fabricación de nuevos tintes sensibilizadores para las emulsiones, que hicieron posible cubrir una gama más amplia del espectro, de la puesta en práctica de las técnicas de grabación y reproducción de sonido, y de la substitución de la iluminación de las lámparas de arco, deficientes en las luces de longitud de onda corta, por la de tungsteno. Una vez que los mecanismos de arrastre de las películas se perfeccionaron, ahorrando vibraciones a las grabaciones, las cámaras cinematográficas comenzaron a atraer el interés de los científicos. De ser un medio utilizado preferentemente con fines didácticos en los primeros años de su existencia, el cine comenzó a entrar en los laboratorios, especialmente, para los estudios de alta velocidad llevados a cabo por sectores industriales como el aeronáutico y el militar. En 1909, C. Cranz aplicó la cámara de cine a este tipo de proyectos. Su *cinematógrafo balístico*, tal como fue denominado en su día, se utilizó para fines militares mayormente, haciendo posible registros de

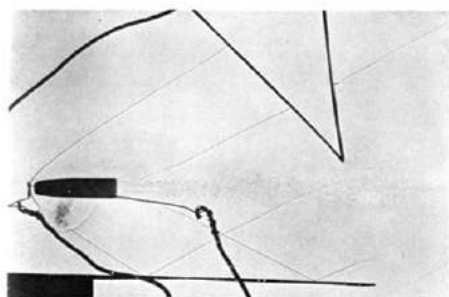


Fig. 6.172. Fotografía de sombra de bala de rifle en vuelo. C. V. Boys. 1915

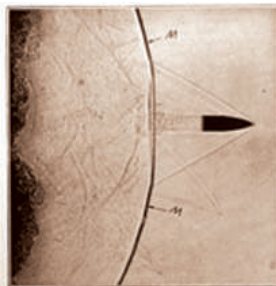


Fig. 6.173. Fotografía de sombra de proyectil. P. P. Quayle. 1925

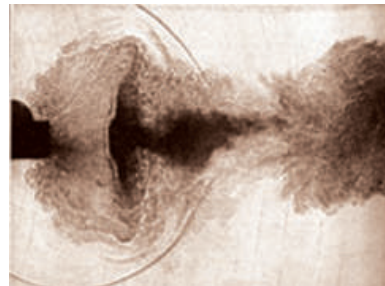


Fig. 6.174. Fotografía sombra de onda expansiva de proyectil. P. P. Quayle. 1925

500 fotogramas en un intervalo de tiempo de 1/5000 de segundo, en exposiciones del orden de una décima de segundo<sup>286</sup>. No es extraño, por tanto, que el lenguaje cinematográfico, que se creaba por entonces en las películas de ficción, comenzara a emplear el movimiento de la cámara con fines expresivos. *El último*, de F. W. Murnau, es tal vez un buen ejemplo de ello<sup>287</sup>.

Por su parte, la aparición de los dispositivos electrónicos, como células fotoeléctricas, válvulas termoiónicas, fotomultiplicadores, osciloscopios, los diferentes tubos de imagen (iconoscopio, vidicon, orthicon, convertidores de imagen) y, posteriormente, los distintos soportes magnéticos para el almacenamiento de datos e imágenes, cambiaron substancialmente el panorama de la fotografía del movimiento. Nuevas formas de obturación y de iluminación, mucho más efectivas y rápidas, permitieron profundizar en los niveles de análisis y de fragmentación del movimiento de los objetos. Las técnicas de producción de imágenes fotoeléctricas y fotográficas iniciaron de esta forma una andadura común que ha prevalecido durante la mayor parte del siglo pasado, hasta confluir en la nueva tecnología digital de la imagen.

### **6.3.3. La fotografía de alta velocidad**

*Todo el mundo sabe que el sol debió empezar  
en un momento determinado y que se apagará algún  
día tal como ocurre con la luz de un flash.*<sup>288</sup>

Edgerton, H. E .

Es preciso insistir en que las fronteras entre este tipo de fotografía y la de otras especialidades, como son las del universo astronómico y atómico, o incluso de la fotogrametría, no están estrictamente delimitadas. La fotografía del movimiento se nutre del conjunto de técnicas desarrolladas a lo largo de la historia en campos tan diversos como son las emulsiones, la óptica, el conjunto de radiaciones electromagnéticas, particularmente de la luz y sus fenómenos de propagación, la fotoelectricidad, o la electrónica. A su vez, cada una de las aplicaciones científicas de la fotografía, en un momento u otro de su quehacer, han acudido al análisis del movimiento y a las técnicas de alta velocidad para completar sus investigaciones. Las fronteras establecidas obedecen, por tanto, más a criterios expositivos y al trabajo cada vez más especializado de los científicos, que a la propia realidad de los acontecimientos, siempre transgresores de compartimentos estancos y etiquetas. Los esquemas propuestos para sistematizar el conjunto tan prolífico de técnicas de imagen de alta velocidad han sido muy numerosos a lo largo de la segunda mitad del siglo XX. El objetivo de estas páginas hace innecesario la presentación exhaustiva de cada uno de ellos, o de cada una de las técnicas desarrolladas a lo largo de este periplo. En su lugar, se propone un esquema que atiende más de cerca a los aspectos conceptuales relacionados con esta materia y a la repercusión que estas técnicas han tenido en la adquisición de conocimiento científico, tareas más afines a nuestros objetivos. De esta manera, observamos cómo la imagen del movimiento de los cuerpos, especialmente los de alta velocidad, se ve afectada por cinco apartados fundamentales (Cuadro nº11)

Tradicionalmente, la imagen de alta velocidad, como cualquier otro tipo de imagen técnica, ha sido producida en función de la variable *exposición*, que hace mención a la capacidad que tiene el sistema fotográfico para convertir los fotones provenientes del objeto y de la escena donde éste se encuentra en signos físicos

Cámara
Luz
Objeto
Imagen
Movimiento

**Cuadro nº11**

identificables, ya sea formados por los granos de plata de una emulsión fotográfica, o de los destellos luminosos de una pantalla fluorescente. A su vez, la exposición se debe a dos parámetros fundamentales: la intensidad de la energía radiante y el tiempo. A nivel práctico, estos dos factores vienen determinados por la velocidad de obturación y por las fuentes de iluminación utilizadas, siendo éstas las dos variables más tenidas en cuenta en el proceso de creación de imágenes de alta velocidad. Sin embargo, a medida que las técnicas de visualización de los fenómenos fugaces fueron perfeccionándose, especialmente desde la incorporación de los dispositivos electrónicos y fotoeléctricos, otros factores, como la resolución, el tamaño de la imagen y del objeto, el nivel de aumentos del sistema, o la composición espectral de la luz, han enriquecido de forma considerable este cuadro.

Existen aspectos comunes que afectan por igual a uno o más de estos apartados propuestos. El análisis de la relación que existe entre tiempo y movimiento de los fenómenos depende en principio del tiempo de exposición del material sensible y de la mayor o menor rapidez del fenómeno en cuestión. Esto nos permite conocer el estado de los objetos antes y después de la toma y de hacer las pertinentes mediciones<sup>289</sup>. Existe una distinción básica en el conjunto de técnicas de alta velocidad que viene dada por el carácter único, o secuencial de las imágenes. La fotografía de los fenómenos en movimiento puede obedecer a un instante, lo que nos da a conocer la posición aproximada del objeto en un momento concreto; o a un continuo, recogiendo en una placa o película la secuencia completa del movimiento del objeto por medios estroboscópicos o de exposición múltiple. En términos generales, se entiende por *fotografía de alta velocidad* aquella que se obtiene con tiempos de obturación inferiores a 1 milisegundo (1/1000); y por *cinematografía de alta velocidad*, aquella que supera la producción de 275 fotogramas por segundo<sup>290</sup>. Valga señalar que para principios de los setenta, los tiempos de exposición conseguidos rondaban la cifra de una décima de microsegundo, con resoluciones del orden de cinco mil por pulgada<sup>291</sup>.

#### **6.3.3.1. La cámara y el estudio del movimiento**

El primer elemento que encontramos en la producción de imágenes de alta velocidad es la cámara, un artilugio que ha sufrido continuas transformaciones desde la creación de la fotografía, pasando de un primer estado asociado a la cámara oscura tradicional, a otros de mayor sofisticación en el que los conceptos



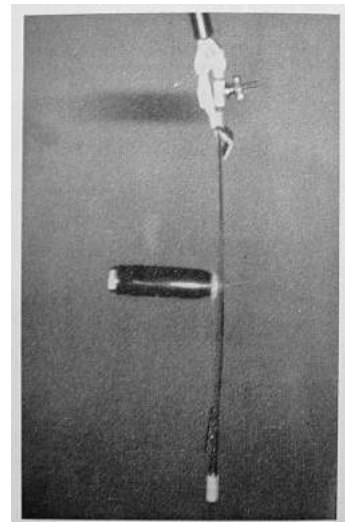
de detector, sonda o máquina- visión saltan a la palestra. La cámara fotográfica más simple, sin más aditamentos que una obturación mecánica y una iluminación básica, es en sí misma suficiente para el estudio del movimiento. Multitud de investigaciones científicas se han realizado con los medios más convencionales, y al alcance de cualquier científico o incluso de cualquier aficionado a la fotografía<sup>292</sup> (Figura 6.175). Durante el período de utilización de los *obturadores mecánicos* y *electromecánicos*, fueron fundamentalmente las fuentes de iluminación las mayores responsables del avance en el registro de fenómenos fugaces. Entre los obturadores mecánicos más comunes desde la invención de la fotografía se encuentran los que son activados por gatillos o por la liberación de resortes, normalmente emplazados en el plano focal o entre las lentes del objetivo. Posteriormente, fueron apareciendo los de funcionamiento por espejos y prismas, y los *rotatorios*, bien de tambor, o de disco tipo Nipkow.

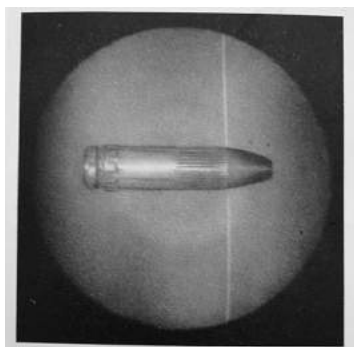


*Fig. 6.175. Delfín rompiendo olas. Estudios del movimiento de delfines y ballenas en base a la estructura mecánica de la piel. 1963.*

Fue la llegada de los procedimientos electromagnéticos, y más en particular de los electrónicos, lo que permitió un avance sustantivo en los sistemas de obturación de las cámaras, al procurar exposiciones cada vez más cortas. La entrada en escena de los *obturadores magneto- ópticos* y *electro- ópticos* supuso un antes y un después en este tipo de operaciones. Los primeros están basados en el *efecto Faraday*, o cambio de polarización que sufren los materiales transparentes por la acción de un campo magnético. Los obturadores de este tipo emplean dos polarizadores colocados en  $90^\circ$  uno respecto del otro. La presencia de un campo magnético, controlado a voluntad del operador, hace rotar en cuestión de microsegundos uno de ellos impidiendo el paso de la luz al material fotosensible. Por su parte, los *obturadores electro- ópticos* obedecen al *efecto Kerr*, o capacidad que tienen algunos materiales transparentes para cambiar a birrefringentes ante la presencia de un campo eléctrico. El posicionamiento en ángulo recto de este campo respecto del paso del haz de luz permite un control preciso y del orden de décimas de microsegundos del tiempo de exposición. El control de la polarización del haz se lleva a cabo mediante dos *prismas Nicol* orientados de forma que el plano de polarización forme  $45^\circ$  con las líneas de fuerza formada por las placas deflectoras. Las células están formadas por un líquido (normalmente nitrobenzeno) o por determinados sólidos cristalinos de gran capacidad de birrefringencia<sup>293</sup>. Las células Kerr comenzaron a ser utilizadas por C. Cranz a principios del siglo pasado en estas operaciones. Posteriormente fueron de gran utilidad en estudios de explosivos, de partículas despedidas en explosiones de cargas, o de la trayectoria de proyectiles. Actualmente se utilizan láseres para activar este tipo de obturadores, llegándose a tiempos de exposición de picosegundos. Es importante señalar que en estas dimensiones temporales tan cortas, el material fotosensible muestra el *error de reciprocidad*, que contradice la ley de proporcionalidad entre los niveles de luz y de densidad obtenidos en las emulsiones. Esta excepción

*Fig. 6.176. Fotografía de alta velocidad con una célula Kerr como dispositivo de activación del disparador. Central de l'Armement Paris.*

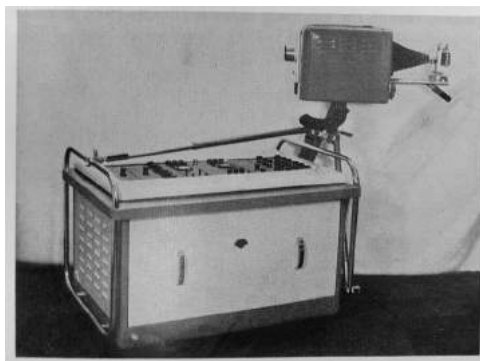




**Fig. 6.177. Fotografía de alta velocidad con un convertidor de imagen como obturador y uso de luz de flash.**

de las leyes de la sensitometría se produce en los dos extremos de la curva característica, que relaciona las dos variables de intensidad lumínica y tiempo; o sea, en exposiciones muy largas con intensidades de luz mínimas, y en exposiciones extremadamente cortas con intensidades muy altas, como es el caso que nos ocupa (Figura 6.176).

La siguiente etapa en esta dirección viene dado por la llegada de los *obturadores electrónicos*, como resultado del avance ocurrido en la tecnología de los tubos de imagen. Entre ellos, hay que destacar de forma particular el iconoscopio, o primer modelo existente de cámara de televisión electrónica, así como los convertidores de imagen, los tubos intensificadores, y la tecnología de tubos de imagen posterior al iconoscopio: vidicon, orthicon, plumbicon, etc. El conjunto de tubos de imagen de televisión puede hacer las veces de sistema de obturación por medio de la capacidad de almacenamiento de su mosaico receptor. Este tiempo de almacenamiento puede ser controlado a su vez con la velocidad con que el haz de electrones barre la superficie del fotorreceptor. Esto permite realizar exposiciones extremadamente cortas haciendo uso de la tecnología de TV más convencional. Adicionalmente, estas imágenes electrónicas solían ser fotografiadas para disponer de un registro permanente sobre papel o película. En el caso de los tubos convertidores de imagen, el procedimiento es muy similar, con la ventaja de que facilitaban el control sobre la longitud de onda de la luz incidente (IR, UV y visible), la amplificación de la luz, el barrido por líneas, o la generación de pulsos simples y múltiples para registros únicos o secuenciales de los fenómenos<sup>294</sup> (Figuras 6.177 y 6.178). Los convertidores de imagen son los mayores responsables de la entrada de la ciencia en el ámbito de la imagen producida en una escala de nanosegundos (ver Cap. 4.3.3, y Fig. 4.50). La gran aportación de los tubos convertidores a estos fines fue aplicar la electrónica a los procesos de obturación y de amplificación de imágenes. Recordemos que el fotocátodo de este tipo de tubos convierte la luz de la escena captada en una imagen electrónica, susceptible de ser sometida a amplificación y de ser controlada en el tiempo. Por tanto, la gran virtud de estas técnicas en relación con la fotografía es su mayor sensibilidad ante estímulos de luz mínimos y la posibilidad de aprovechar las potencialidades inherentes a la electrónica, particularmente el efecto de la fotomultiplicación. Por el contrario, sus principales inconvenientes son los efectos de rotación y distorsión que se producen en la imagen, y sus resultados espurios en la captación de fenómenos de descargas eléctricas. Los tubos convertidores, junto con las células Kerr, fueron los dispositivos que permitieron realizar exposiciones más cortas, particularmente, en fenómenos donde la rapidez de la fuente de iluminación no es el factor determinante, como es el caso de la fotografía de estrías aplicada a túneles de viento, estudios balísticos o de impacto de ondas. La sincronización perfecta del instante de la exposición con la emisión del pico de luz más alto ha sido siempre una de las claves para conseguir los mejores efectos en este tipo de imagen. Las células Kerr tienen el inconveniente de absorber entre el 75 y 80% de la luz empleada, algo que queda compensado por su extrema rapidez de acción y alta resolución. Por el contrario, los tubos convertidores facilitan la intensificación



**Fig. 6.178. Convertidor de imágenes y consola de control. Puede registrar imágenes hasta 150.000 milisegundos. Mullard Electronic.**

de la luz a costa de una pérdida de resolución por la formación de *nubes de electrones*<sup>295</sup>. La entrada en escena de la física del estado sólido, a remolque del avance experimentado en el estudio de los materiales semiconductores, ha abierto un nuevo campo de acción a nuevas formas de obturación mediante el uso del efecto de polarización producido en este tipo de materiales. Los *obturadores electro- ópticos de estado sólido* presentan la ventaja de ser más pequeños, de menos consumo, longitud del haz menor, mayor durabilidad y menor toxicidad<sup>296</sup>.

### 6.3.3.2. De la exposición única a la múltiple

Una línea divisoria básica sale a relucir en las técnicas de análisis del movimiento si atendemos a la diferencia que se produce entre aquel tipo de exposición que se lleva a cabo de forma única e instantánea, recogiendo en un sólo fotograma un momento muy preciso del devenir del objeto, y aquel otro, donde la exposición capta en uno o varios fotogramas una secuencia del movimiento del objeto en el tiempo. Esto último se consigue por dos caminos: con una *exposición prolongada*, ayudada por mecanismos de *exposición múltiple* o de *dissección de imagen*; o con el uso de varias cámaras.

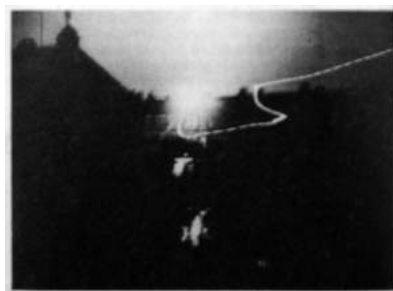


Fig. 6.179. Efecto atmosférico de bola de luz. 1972.

Una de las técnicas de exposición prolongada más utilizada en los laboratorios desde los orígenes de la fotografía, ha sido aquella consistente en dejar que sea el propio fenómeno el artífice del momento de la exposición. El procedimiento es tan simple como dejar que el obturador permanezca abierto en espera de que el objeto fugaz aparezca en escena y genere su propia imagen. Para ello, es fundamental que el objeto disponga de iluminación propia y que ocurra de forma aislada y separado del fondo donde acontece, tal como ocurre con los fenómenos eléctricos atmosféricos (Figura 6.179). Otra variedad dentro de este tipo de técnica es la que registra el movimiento del objeto en una misma placa, haciendo uso del disparo sucesivo de múltiples flashes (efecto estroboscópico), técnica ampliamente utilizada, entre otros, por Marey y Edgerton desde los inicios de la cronofotografía, y que será tratada más en profundidad en el próximo apartado dedicado a las técnicas de iluminación.

Una tercera vía práctica para este tipo de exposición continuada es mediante la técnica de *fotografía de barrido* (streak photography), procedimiento muy utilizado desde principios del siglo pasado en imagen de alta velocidad, con resultados muy llamativos y aparentes<sup>297</sup> (Figuras 6.180, y 6.181). En la *cámara de barrido* (streak camera), la película pasa de forma continuada a través de una ranura estrecha, dando lugar a una imagen en forma de figura prolongada que reproduce en una dimensión el paso del objeto a través del orificio. Aquí se evita el lapsus o vacío que se produce entre fotogramas, típico de otras técnicas de exposición múltiple.

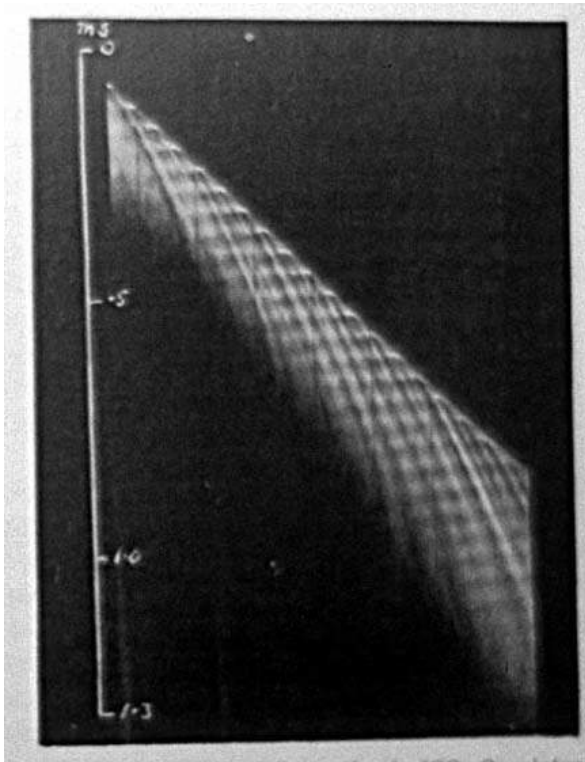
*La técnica consiste en mover la emulsión fotográfica en ángulo recto respecto del trazado medio de la imagen. El movimiento angular de la imagen a lo largo del negativo representa la variación de la velocidad. El movimiento relativo imagen- emulsión se puede llevar a cabo moviendo la emulsión, o moviendo la imagen óptica o electrónicamente. Como la velocidad queda fijada en el negativo*



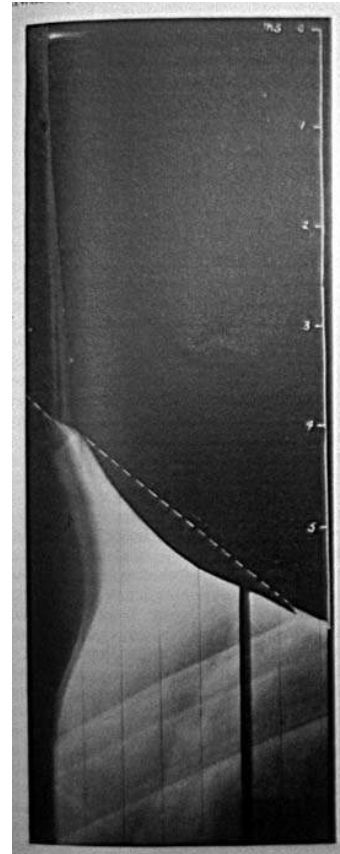
*por la tangente, la velocidad de escritura debería ser ajustada, a ser posible, para mostrar una imagen aproximada de 45°, de cara a conseguir el máximo de precisión.*<sup>298</sup>

En este apartado de fotografía de exposición múltiple tienen cabida también las técnicas de exposición cinematográfica. La relación que se establece entre el número de fotogramas grabados respecto de la proyección de los mismos a un ritmo determinado, se encuentra en la base del efecto cinematográfico. Muchos fenómenos grabados a velocidad normal (24 fps) se pueden estudiar proyectándolos posteriormente con un control de parada por fotogramas, acelerándolos, ralentizándolos, o incluso en retroceso. La velocidad de grabación se acomodará a la velocidad del movimiento en cuestión. Las cámaras de cine científico más convencionales pueden grabar a 24, 48, 64 o 128 fotogramas por segundo (fps) mediante los sistemas de obturación convencionales. Por encima de esta velocidad, se graba de forma continuada y la imagen queda dividida en fotogramas por la acción de un prisma o un espejo rotatorios, llegándose por este medio a cifras cercanas a los 100.000 fps<sup>299</sup>. Los factores a tener más en cuenta en este tipo de exposiciones son la frecuencia de fotogramas, la calidad de la imagen y los niveles de precisión y de resolución en relación con el tipo de iluminación utilizado, especialmente en lo que respecta a su intensidad, distribución espectral y variación en función del tiempo.

Entre las primeras experiencias de registro cinematográfico de alta velocidad, cabe destacar los trabajos de C. Cranz y H. Schardin. Estos autores idearon en 1929 un sistema de *fotografía de sombra* para series cortas de objetos en movimiento, como continuación de los trabajos de Mach y Toepler; y del cinematógrafo balístico de Cranz, ya comentado. En este método, se utiliza un doble destello de luz llevado a la lente, que es biseccionado por un espejo. El tiempo entre disparos de flashes puede ser muy reducido, llegándose



*Fig. 6.180. Fotografía de barrido de una detonación de combustibles gaseosos. 1932.*



*Fig. 6.181. Fotografía de barrido de una detonación de combustibles gaseosos. Fotografías del efecto spin que presentan, a 200 metros por segundo. 1932.*



con este sistema a velocidades de un microsegundo. Los inconvenientes de este sistema fueron la reducción del tamaño de las fotografías y no poder utilizar otro tipo de iluminación que el de sombra, deficiencias que fueron pronto subsanadas por otros autores con la utilización de tubos de rayos catódicos como fuente de iluminación<sup>300</sup>.

La exposición múltiple con empleo de varias cámaras se ha empleado desde los primeros trabajos de cronofotografía del movimiento animal y humano de E. Muybridge. Con los años, se ha convertido en un método ampliamente utilizado en el ámbito de la balística, preferentemente en ensayos con *tubos de presión* y *túneles de viento*, a los que son acoplados un número determinado de cámaras, encargadas de registrar secuencialmente el paso de los proyectiles. La exposición se suele realizar con técnica de fotografía de sombras, con un control preciso de las condiciones de vacío en el interior de estos tubos, y con la utilización de células fotoeléctricas para sincronizar la emisión de destellos de los flashes.

*Fig. 6.182. Desintegración de una bombilla. 5 fotogramas de una serie de 120 de una película de una cámara de tambor, a una velocidad de 75 m/sec, tomada a 5.000 flashes/sec. 1965.*



Para conseguir velocidades superiores a las ofrecidas por los sistemas anteriores se utilizan las *cámaras de tambor*. En este caso, una película de tan sólo unos metros es adherida al tambor de la cámara, diseñado en forma cilíndrica. Este gira accionado por un motor que llega a velocidades de 7.000 r.p.m. Cada rotación del tambor representa una exposición. En caso de utilizarse tambores con lentes incorporadas en las ranuras, se consiguen exposiciones de hasta 8 millones de fps. Normalmente, este tipo de cámara se utiliza con la técnica de barrido (Streak photo), obturadores de células tipo Kerr, e iluminación de flashes estroboscópicos, aprovechados en los momentos de mayor intensidad. Esta es una de las técnicas más utilizadas para el estudio de los procesos de fundición, deformación, explosión y soldadura de filamentos y fusibles; detonaciones de explosivos, flujos aerodinámicos, propias de investigaciones aeroespaciales, y en fractura de metales y cristales (Figuras 6.182; 6.183; 6.184; y 6.185.). Las cámaras de tambor han ido perfeccionándose con el tiempo, incorporando espejos y prismas rotatorios para incrementar el número de fotogramas por segundo.

En el campo del lanzamiento de cohetes y misiles han proliferado las *cámaras de alto rendimiento* tipo Mitchell, Bowen y Fastax, especializadas en proporcionar recuentos muy ajustados de la relación espacio- tiempo<sup>301</sup>. Este tipo de aplicaciones ha potenciado la sincronización de las exposiciones con datos suministrados por dispositivos electrónicos encargados de la transmisión de señales, o del registro de los tiempos de exposición. Es frecuente también el uso de cámaras de este tipo a bordo de los proyectiles para la captación de los hechos externos, y de los detalles del funcionamiento interno de los mecanismos.

Otro método aplicado en este contexto es la *disección de imagen*. Consiste en dividir la imagen en múltiples elementos o parcelas, que se registran de forma independiente, para ser recombinados al final del proceso. En este caso, el éxito de la operación no se debe al movimiento de la película o de la imagen grabada de

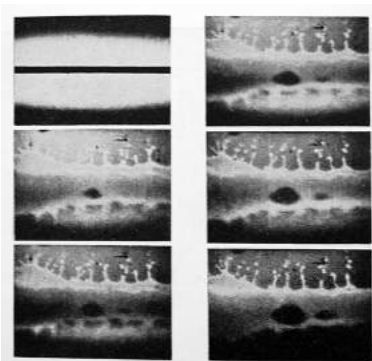
forma secuencial, sino a la grabación múltiple de los elementos que componen la imagen por medio de un disco de barrido (tipo Nipkow), o de espejos piramidales, de apertura movable. El fenómeno queda grabado en su totalidad respecto al tiempo en una misma placa. Una revolución del disco produce 3.000 imágenes, y los fotogramas pueden ir a razón de 30 a 1 millón de fps. Para el análisis de fenómenos complejos, es importante contar con un medio que diseccione la imagen en líneas en vez de presentarla como una variación continua de tonos. El *sistema lenticular*, ideado por Courtney- Pratt como método de disección, consigue este efecto mediante una parrilla de pequeñas lentes en forma de cilindro que se



*Fig. 6.183. Cámara de tambor Strobodrum, con la cubierta abierta. 1965.*



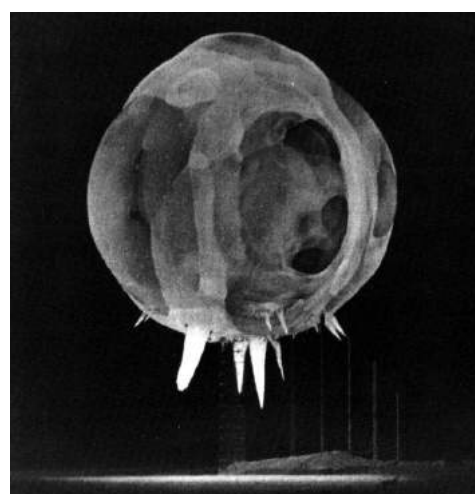
*Fig. 6.184. Cámara de tambor con dispositivo de flash.*



*Fig. 6.185. Secuencia de la explosión de un filamento de tungsteno. Aumento 16 X. Aberdeen Proving Ground. 1957.*

interpone a la placa fotográfica. Este entramado facilita que la imagen quede formada por líneas de puntos, cuya proximidad determina su nivel de resolución. Como la separación que existe entre cada par de puntos es mayor que el tamaño de cada uno de ellos, se procede a desplazar la placa una distancia equivalente a un punto por cada destello, lo que da lugar a una imagen sin necesidad de tener que ir cambiando de fotogramas<sup>302</sup>. Por otro lado, encontramos las *cámaras de múltiples lentes*. En este caso se produce un número determinado de imágenes de pequeño formato en una misma placa por la acción de un obturador de disco rotatorio que va descubriendo las lentes en su barrido<sup>303</sup>.

Las aplicaciones de la fotografía de alta velocidad por exposición múltiple son muy diversas, tanto en el campo de la ciencia experimental como aplicada. En la investigación científica, ha sido ampliamente utilizada en el registro fotográfico de las señales de los osciloscopios, en el diseño de ingeniería mecánica, estudios balísticos, observación y análisis de explosiones nucleares (Figura 6.186), estudio de la acción de las corrientes de gases y líquidos, de la presión de los gases, del comportamiento de los gases en el interior de los tubos de rayos catódicos bajo la acción de distintos campos magnéticos, en los procesos de deformación de superficies sujetas a alta tensión, en fenómenos de formación de cavidades tras impactos de sólidos contra líquidos, en procesos de transferencia de calor en



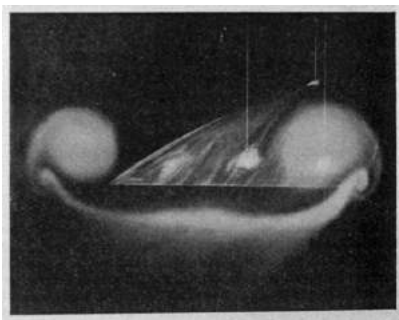
*Fig. 6.186. Fotografía del efecto “bola de fuego” de una explosión nuclear en Nevada, 1962. Tomada con una cámara Raptronic en menos de un milisegundo.*

superficies en ebullición, quebrantamiento de cristales, velocidad y comportamiento de fluidos en seres vivos, vibraciones en el interior del oído, o ritmo cardíaco, etc. Toda esta experiencia ha creado un bagaje de conocimiento que ha sido aprovechado por el sector industrial y del armamento en áreas como el control de calidad en las cadenas de producción, control de los fenómenos físico-químicos de la producción de hierro y acero, en el estudio de las reacciones en altos hornos, del funcionamiento de lámparas de flash, de los errores en toda suerte de maquinaria, en pruebas de automoción, estudio de cubiertas de neumáticos, de combustión de motores, de los efectos de los impactos de líquidos en tejidos, en la producción textil, concretamente en el control de los telares y las operaciones de hilvanado; en técnicas de disparo, estudios de la presión producida en las primeras fases de explosiones, en disparo de torpedos, misiles y explosiones submarinas, o en el estudio de las llamas<sup>304</sup>.

### 6.3.3.3. La luz en el análisis del movimiento

La luz y el conjunto de radiaciones electromagnéticas son tal vez el elemento más determinante en la producción de imágenes de alta velocidad. Por un lado, contamos con la *luz natural* perteneciente al espectro visible, que sigue siendo una fuente muy recurrida en estas tareas. En segundo lugar, disponemos del conjunto de dispositivos generadores de *iluminación artificial*, también en el espectro visible, donde cabe destacar los distintos tipos de lámparas de arco, continuas y de flash, y más recientemente la luz láser. Complementariamente, hay que tener en cuenta el amplio abanico de posibilidades abierto a estas técnicas una vez que se aprovecha el espectro no visible de las radiaciones: IR, UV, Rayos X y de radio, fundamentalmente. La correcta utilización del espectro electromagnético es crucial para conseguir mayores o menores velocidades en la exposición de los materiales fotosensibles. A menudo, el uso de lámparas deficitarias en el espectro más próximo al azul y el violeta, como son las de tungsteno, va en detrimento de la velocidad conseguida por las emulsiones<sup>305</sup>. Por otro lado, disponemos de los distintos efectos y fenómenos producidos por la luz, tales como los de transmisión, absorción, reflexión, interferencia, polarización, sombras, estrías, o contraste de fase, que constituyen una de las herramientas de mayor beneficio para la imagen de alta velocidad.

Los fenómenos naturales estudiados por la imagen en general, y por la de alta velocidad en particular, pueden ser divididos en fenómenos de *radiación propia*, tales como los térmicos, los de luminiscencia y los radioactivos; y fenómenos *no irradianes*, que necesitan de la luz o de otras radiaciones para hacerse visibles. En este último grupo encontramos fundamentalmente los transparentes y los opacos. Las formas de utilizar la luz para iluminar los objetos no radiantes son muy variadas. En el apartado de la microscopía vimos las más fundamentales (Ver Cap. 6.2.3). La posición de las fuentes respecto de la muestra (de frente, de contra, lateralmente), y de qué forma son utilizados los haces de luz (luz difusa, paralela o puntual, a través de ranuras, direccional, reflejada especular) son las dos variables principales a tener en cuenta. Por su parte, el uso de la luz puntual o paralela da lugar a tres técnicas de iluminación fundamentales en el ámbito de la imagen del movimiento: la fotografía de sombras, la de estrías, ya comentadas, y la de *interferencia*. Este esquema se complica con la utilización de toda suerte de *marcadores*, tales como partículas, tintes, humos, polvo, burbujas, corrientes, líquidos birrefringentes, banderas, etc., elementos imprescindibles a la hora de visualizar el movimiento de determinados fenómenos, particularmente el de fluidos transparentes<sup>306 y 307</sup>. Valga resaltar que en el ámbito de la aeronáutica, por ejemplo, la utilización de marcadores es fundamental para obtener una visión tridimensional de los fenómenos, algo vedado a las técnicas antes enumeradas<sup>308</sup> (Figura 6.187.).



**Fig. 6.187.** Fotografía de alta velocidad del humo producido por un vórtice formado tras un ala delta, posicionada en un tubo de viento. 1957.

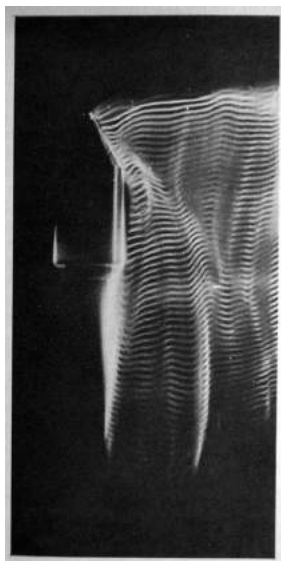
La luz natural sigue siendo un recurso muy utilizado en estas operaciones, toda vez que los fenómenos a estudiar se producen en escenarios naturales de luz solar, o en situaciones donde la luz artificial presta un servicio meramente complementario; tal es el caso del estudio de lanzamiento de proyectiles, naves, misiles, torpedos; del estudio aerodinámico de toda suerte de vehículos, de determinados procesos industriales, o de la observación de seres vivos en medio naturales. Dentro del ámbito de la luz artificial, se suele establecer una separación básica en función de la continuidad o intermitencia de las emisiones de las fuentes de iluminación disponibles. Normalmente, el criterio que prevalece a la hora de elegir un sistema de iluminación continua, intermitente o estroboscópica, viene determinado por el fenómeno a estudiar, buscándose normalmente aquél que mayor intensidad lumínica proporciona. En el caso de la luz discontinua, este requisito es básico dado la necesidad de contrarrestar las exposiciones tan cortas. El calor desprendido por la fuente es otro factor a tener en cuenta por los posibles daños, o cambios que puede ocasionar en las muestras.

Los destellos producidos por arcos eléctricos al aire libre fue una de las primeras formas de aprovechar la luz eléctrica artificial para lograr imágenes de objetos en movimiento. Posteriormente, la producción de los destellos en el interior de las válvulas quedó condicionado por la utilización de distintos tipos de materiales en la fabricación de los electrodos, o por las condiciones de vacío o por la presencia de determinados gases en el interior de las mismas. (ver Caps. 4.2.1. y 4.2.2.). Las de arco de xenon y las de mercurio de alta presión son ampliamente utilizadas desde mediados del siglo pasado<sup>309</sup>, tanto de forma continua como de flash, entre otras razones, por la facilidad para controlar su distribución espectral y por su alta intensidad. Dentro de los flashes estroboscópicos existen los de funcionamiento químico, o *flashes pirotécnicos*, que utilizan explosiones controladas; y los *electrónicos*. Los primeros se producen por medio de hilos finos de metal o de algún tipo de membrana conectados en paralelo con una serie de condensadores, y emplazados en el interior de tubos con gases como el argón. Los flashes electrónicos controlan los destellos mediante disparadores de pulsos producidos por condensadores, que a su vez son activados por thyatrones. Aparte de estos dos grandes grupos, encontramos los que generan *pulsos de rayo X*, *pulsos láser*, y los que utilizan materiales semiconductores, conocidos comercialmente como *luz superradiante* (super radiant light). Una técnica especial dentro del estudio de este tipo de fenómenos es la "*slip- sync*", que produce un efecto de movimiento lento, ideal para el análisis de vibraciones<sup>310</sup>. Los tubos de rayos catódicos pueden ser utilizados también como flashes con velocidades de hasta un microsegundo. Su mayor inconveniente radica en la baja iluminación que proporcionan, aún cuando es comparable a veces, al producido por una lámpara de tungsteno, o un arco eléctrico producido al aire libre. El uso de flashes requiere de dispositivos que sincronicen con perfección la posición del objeto en el momento del encendido y de la exposición, acciones que normalmente se consiguen mediante células fotoeléctricas y circuitos eléctricos con tiempos de retardo establecidos de antemano. Una variedad de iluminación discontinua es la de *flash de alta repetición*, mediante uso de circuitos de multicondensadores. Esta técnica es utilizada normalmente en fotografía de estrías y de sombras, y para el análisis espectrográfico de reacciones químicas (*espectroscopía de resolución temporal*), y el estudio fotomicrográfico de objetos en movimiento por *contraste de fase*<sup>311</sup>.

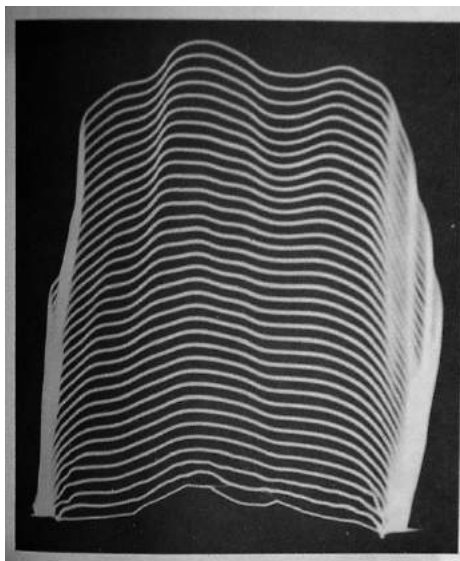


El uso de flashes de repetición permite la técnica de la *exposición múltiple* de un objeto en una misma placa, técnica que se remonta a los primeros trabajos de Marey en cronofotografía. Este procedimiento se ha utilizado con profusión en balística para el estudio de disparos de proyectiles. El uso de hilos interpuestos en el paso de los proyectiles, como método para conseguir la perfecta sincronización de las exposiciones, tal como pusieron en práctica Mach y otros investigadores, ha sido reemplazado por sistemas más precisos mediante el uso de micrófonos receptores de la onda expansiva del arma, capaces de desencadenar el disparo en cadena de la lámpara. En el caso de exponer sucesivos fotogramas de una película en sincronización con el disparo continuado del flash, es necesario la utilización de dispositivos magnéticos u ópticos, o líneas de retardo electrónicas, capaces de emparejar el movimiento mecánico del mecanismo de arrastre de las cámaras de tambor, o de las ranuras estandarizadas del celuloide con la emisión sucesiva de los destellos. Dentro de este campo de aplicaciones, es importante resaltar la utilización de flashes de alta intensidad y frecuencia, técnica muy utilizada en el estudio de corrientes de aire en el sector de la aerodinámica. Este tipo de destello de alta intensidad crea un efecto muy particular, óptimo para el estudio de este tipo de fenómenos. Básicamente, consiste en que cada destello emite una serie de partículas ionizadas en forma de trazo, trazo que es doblemente iluminado como resultado de la persistencia del anterior durante un breve período de tiempo. Si el destello se produce en el interior de una corriente de aire, cada uno de los trazos se verá desplazado una cierta distancia por la acción de la corriente, proporcionando así una imagen del movimiento del aire. Esta técnica se ha utilizado desde 1958 en el estudio aerodinámico de corrientes producidas a velocidades supersónicas en el interior de túneles de aire, preferentemente para estudiar la forma de propagación, el comportamiento ante obstáculos, los fenómenos de turbulencia y de propagación de ondas acústicas, dando lugar a imágenes de gran valor estético<sup>312</sup> (Figuras 6.188; 6.189; y 6.190). A nivel práctico, este tipo de técnica se aplica al estudio de los flujos producidos en turbinas y motores, o para comprobar la eficiencia calorífica de las llamas producidas por distintos materiales a través de túneles<sup>313</sup>(Figura 6.191.).

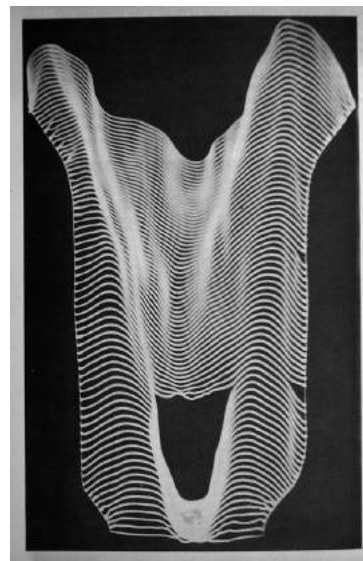
Conviene resaltar en este contexto que los tiempos y velocidades de producción de los destellos en el conjunto de técnicas de iluminación por flash han ido



**Fig. 6.188.** Fotografía de un flujo supersónico. 1965.



**Fig. 6.189.** Corriente paralela de aire con flash de cuarzo controlado a 10 kcps. 1965.



**Fig. 6.190.** Flujo supersónico tras un obstáculo, iluminado con flash de cuarzo controlado a 20 kcps. 1965.

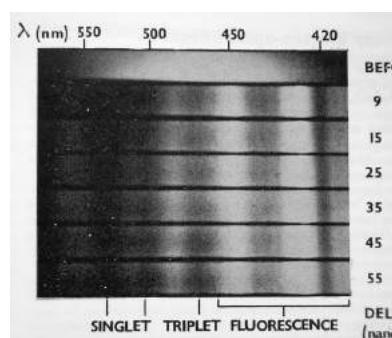
**Fig. 6.191.**  
*Flujo  
rotatorio  
producido  
en el  
interior de  
un cilindro  
de un  
motor  
diesel.*  
1965.



controlándose y perfeccionándose con la utilización de condensadores, capaces de acumular pequeñas corrientes eléctricas que pueden ser descargadas de golpe en pulsos muy intensos, obviándose el uso de los mecanismos inherentes a la propia lámpara. La *tecnología de generación de pulsos de alta velocidad* se ha convertido en una rama de la electrónica con una profunda implicación en numerosas disciplinas científicas, y más en particular en la producción de imagen de alta velocidad. El concepto de pulsación electrónica ha invadido el análisis de los fenómenos en movimiento hasta el punto de atraer la atención

de los científicos sobre la posibilidad de estudiar bajo esa perspectiva fenómenos tan diversos como son las descargas eléctricas o las emisiones del propio sol, tal como señala Edgerton en el encabezado de este capítulo. La generación de pulsos a partir de la corriente acumulada en un condensador puede materializarse en la producción de impulsos de corriente y de voltaje, de flashes de rayos x y de neutrones, en calor, en campos magnéticos, impulsos acústicos, en señales para sistemas de transmisión y de detección, o en impulsos de luz<sup>314</sup>.

La tecnología de generación de pulsos se ha visto ampliamente beneficiada por la llegada de la luz láser. Los láseres de rubí emitidos en forma de pulsos han sido extensamente utilizados en imagen de alta velocidad a modo de iluminación estroboscópica. Los sistemas de obturación por células Kerr y por espejos rotatorios son los más utilizados en este contexto. La *cámara láser*, tal como ha pasado a denominarse esta técnica en el ámbito de la imagen de alta velocidad, ha sabido aprovechar las cualidades de este tipo de luz (monocromatismo, colimación y coherencia) para ser aplicada en áreas como la microscopía, la visualización de flujos, en fenómenos de fotoelasticidad dinámica, espectroscopía de resolución temporal aplicada a procesos moleculares que ocurren en nanosegundos<sup>315</sup> (Figura 6.192.), en procesos de cristalización, en sistemas de detección de uso militar y en la producción de fotografía de estrías<sup>316</sup>. La ventaja del láser en fotomicrografía de alta velocidad se debe a su poder de iluminación puntual y a la rapidez de emisión de flashes a modo de pulsos intensos pero extremadamente cortos, lo que redunda en una mayor protección de las muestras. La doble capacidad del láser, como fuente de iluminación e instrumento de acción mecánica, lo convierte en una herramienta ideal para operaciones microquirúrgicas, donde es posible la visualización *in vivo* de los pasos de la intervención. La transmisión de imágenes a través de fibras ópticas por impulsos de luz de este tipo ha abierto un campo inmenso de exploración a multitud de áreas científicas y tecnológicas. (ver Cap. 5.5.3..)



**Fig. 6.192.** *Secuencia espectral  
producida por láser en un medio  
electrolítico.* 1968.

#### 6.3.3.4. Más allá del espectro visible

Una vez que sobrepasamos el umbral de la luz visible, las posibilidades para las técnicas de imagen de alta velocidad se multiplican. En primer lugar, contamos con la radiación UV, que precisa normalmente de marcadores fluorescentes, que se

añaden a los fluidos que van a ser fotografiados. Las técnicas estroboscópicas son de gran utilidad en estas situaciones<sup>317</sup>. Otro grupo de radiaciones es el perteneciente a los rayos X, ampliamente utilizados como fuente de iluminación en este tipo de fenómenos. La gran ventaja de la *radiografía de alta velocidad* es su capacidad para hacer visible los fenómenos que quedan ocultos por elementos interpuestos entre la cámara y el objeto, como suele ser el caso del humo y las partículas resultantes de las explosiones, o la propia luz producida por destellos demasiado intensos que desbordan la capacidad fotosensible de la emulsión, como ocurre con las explosiones de hilos eléctricos, fusibles y filamentos. O también, por tratarse de fenómenos que quedan ocultos por cuerpos opacos, tal como ocurre con el impacto de ondas sonoras en sólidos, gases y líquidos; en el estudio de proyectiles en el interior de cañones, o a su paso a través de distintos materiales; y en investigaciones estructurales de los procesos internos de toda suerte de maquinaria. A comienzos de los cincuenta, se consiguieron velocidades de microsegundos y de décimas de microsegundo en radiografía de fenómenos explosivos; particularmente, en explosiones realizadas dentro del agua, proyectiles en vuelo, descargas eléctricas, prácticas de fundición, estudios de balística y de ondas sonoras producidas por sólidos sumergidos en líquidos<sup>318</sup>. Una década más tarde, en los sesenta, ya fue posible visualizar fenómenos y objetos ocultos por láminas de capas de tres pulgadas de acero con exposiciones de menos de un microsegundo<sup>319</sup>. También ha sido posible realizar estudios estereoscópicos con este tipo de iluminación, con flashes de repetición y en combinación con convertidores e intensificadores de imagen<sup>320</sup>. Esta fórmula, asociada a las técnicas de vídeo, ha constituido una de las líneas de actuación más certeras para obtener mayores niveles de penetración en los objetos. El *metallonicon*, técnica desarrollada en 1974, es un buen ejemplo de ello<sup>321</sup>.

Los flashes de rayos X pueden ser generados con mayor o menor intensidad, y ser utilizados siguiendo el *método Craz-Schardin*, con múltiples cámaras asociadas a sus correspondientes unidades de flash, ya sea con la utilización de un sólo destello, o con efectos estroboscópicos para aplicaciones cinematográficas. Asimismo, pueden utilizarse con cámaras de tambor en la que la distancia de los fotogramas queda fijada por la velocidad de rotación y de los disparos de flashes (Figura 6.193). Por su parte, los intensificadores se suelen utilizar cuando la intensidad de la radiación es muy reducida, hecho que queda agravado por la extrema rapidez de los destellos<sup>322</sup>. En este caso, el registro de las pantallas de fósforo de los intensificadores se ha visto beneficiado por el uso de emulsiones fotográficas de alta velocidad.

Las aplicaciones más comunes de la radiografía de alta velocidad son en el área de impactos, explosión de hilos y filamentos eléctricos, estudios de plasmas sometidos a campos magnéticos, impacto de ondas en sólidos, y a procesos de fluidización mediante partículas de diferentes niveles de opacidad a los rayos X, a modo de marcadores<sup>323</sup>. A mediados de la década de los setenta, comenzaron las investigaciones encaminadas a encontrar sistemas de monitorización en tiempo real de la técnica de difracción de rayos X, con la ayuda de intensificadores de imagen, tubos vidicon de alta resolución y pantallas fluorescente de grano fino<sup>324</sup>. Para exposiciones de radiación continuada, los rayos X fueron pronto sustituidos por la emisión de neutrones o de rayos gamma. Hay que tener presente



Fig. 6.193. Dispositivo Strobokin para cinematografía de alta velocidad con flashes de rayos X y cámara de tambor. 1965.

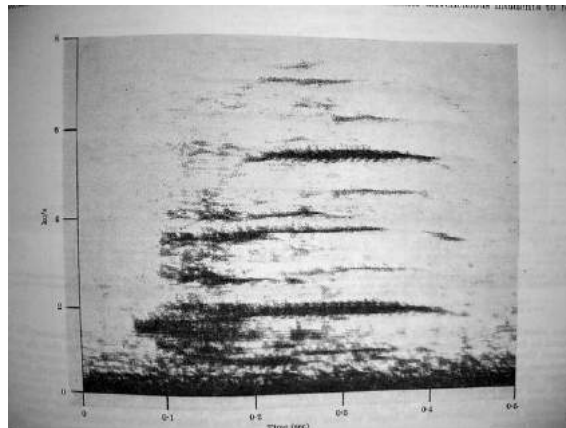
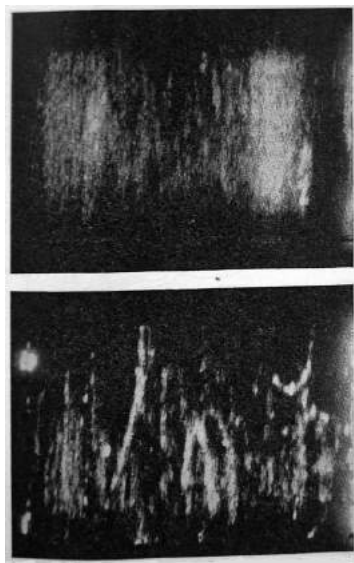


que la generación de neutrones o electrones en forma de pulsos ultrarrápidos puede producirse con equipos muy similares a los de rayos X.

Hacia el otro lado del espectro electromagnético, nos encontramos con el IR, las ondas de radio y las vibraciones mecánicas propias del sonido, espectro ampliamente utilizados en el estudio por imagen de procesos dinámicos de media y alta velocidad. La fotografía de IR ha sido encomendada mayormente a la observación del comportamiento de animales en habitats oscuros, o de fenómenos atmosféricos y estelares, que precisan de exposiciones continuadas de varios minutos<sup>325</sup>. Por su parte, en el espectro de radio y de las vibraciones sonoras, destacan los diferentes tipos de ecoscopios, sónares, radares, sismógrafos, técnicas de ultrasonido, y dispositivos electrográficos reproductores del sonido, basados en tecnologías en la que es fundamental la generación y registro de pulsos y señales relativos a fenómenos en movimiento. La emisión de descargas intensas de radiofrecuencias en túneles aerodinámicos sometidos a muy bajas presiones ha sido un camino alternativo para poder visualizar fenómenos propios de fluidos, imposibles de observar por métodos ópticos<sup>326</sup>. En el campo de la oceanografía encontramos los sónares, una de las técnicas más utilizadas en este medio, debido en parte a la dificultad de aplicar sistemas de observación óptica. Entre sus muchas utilidades, destaca el estudio del movimiento y del comportamiento de los peces y bancos de peces, de las propiedades físicas de los fondos marinos, de los niveles de profundidad, de accidentes oceanográficos, estudio de corrientes, o por ser una herramienta de ayuda a la pesca. El procedimiento habitual en este tipo de técnicas se basa en el envío de señales hacia los objetos desde la superficie, o desde módulos sumergibles, y en la correspondiente detección de las señales de vuelta por medio de receptores capaces de amplificarlas y de convertirlas en estímulos sonoros reproducibles por auriculares, o mediante gráficos o figuras de osciloscopios, susceptibles a su vez de ser fotografiados. El sónar presta también un servicio inestimable a la fotografía de profundidades, aportando información relativa al posicionamiento y distancia de los equipos respecto del objeto, activando flashes de forma automática, o dando a conocer el momento exacto de las exposiciones<sup>327 y 328</sup> (Figuras 6.194; 6.195; y 6.196).

Las técnicas sismográficas aplicadas a los fondos marinos completan este tipo de información, aprovechando el agua como conductora de las ondas, sin necesidad de desplazar la instrumentación a las profundidades. Explosivos, destellos luminosos y emisión de descargas a modo de pulsos son las técnicas

*Fig. 6.194. Sonar escaneado electrónicamente. Fotografías de tiempo integrado del sonido de peces. 1964.*



*Fig. 6.195. Espectrogramas a partir de una señal acústica de un hidrofono que recoge los sonidos del Manatí de las profundidades del mar. 1965.*



más utilizadas para el estudio de las frecuencias que dan a conocer las características de la superficie y de las capas más profundas de los fondos. La visualización de los fenómenos sigue el método habitual utilizado para los sónares (Figuras 6.197; y 6.198). Las investigaciones de los fenómenos producidos por el sonido dentro del escenario controlado de los laboratorios, se han venido sucediendo

desde los primeros trabajos de P. Langevin en 1917. En este contexto, el osciloscopio ha sido una de las herramientas más útiles, por ser capaz de hacer visible las vibraciones sonoras captadas por los cristales a partir de su conversión en voltajes de corriente alterna. Su aplicación ha sido determinante en el estudio de vibraciones de metales<sup>329</sup>, o en ultrasonido. Las técnicas de ultrasonido son de gran utilidad en los estudios sísmicos, mediante la emisión de pulsos de sonido de alta frecuencia. Los pulsos son generados por circuitos oscilatorios o generadores de alta frecuencia que excitan dispositivos piezoeléctricos o magnetorrestrictivos capaces de producir ondas mecánicas de alta frecuencia. Las señales son captadas por detectores llamados geófonos, que muestran las propiedades y defectos de los materiales a partir del cambio de velocidades ocurrido en las señales. También en este caso, es la pantalla del osciloscopio la que representa los tiempos relativos al envío y recepción de señales y las características geográficas del terreno. La fotografía de estrias es también una herramienta de gran utilidad en estas operaciones, dado su capacidad para hacer visible y determinar las velocidades de los frentes de ondas relativos a los movimientos sísmicos. Estudios realizados en laboratorio sobre la formación de ondas en líquidos por la acción de vibraciones mecánicas han demostrado la eficiencia de este método<sup>330</sup>. Cualquier cambio en la elasticidad de las ondas es detectado con gran precisión con este procedimiento<sup>331</sup>.

La técnica por *impacto de ondas* es similar a las de sonido y ultrasonido, pero con la ventaja de no producir vibraciones en las muestras. Consiste en la producción de una descarga eléctrica en el interior de un líquido, con el fin de producir una onda de compresión que incida sobre el material de estudio. Esto posibilita el análisis de sus efectos, al ser recogidos por un detector, tipo cristal de cuarzo o piezoeléctrico. Este método puede completarse con la técnica de

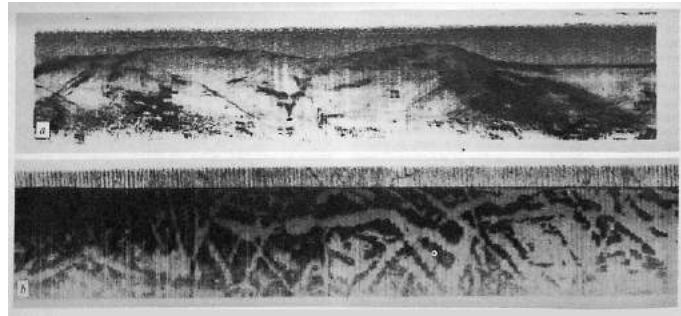


Fig. 6.196. Sonografías desde 48 kHz a una profundidad de 150 m., y 2500 a 5000 , respectivamente. 1972.

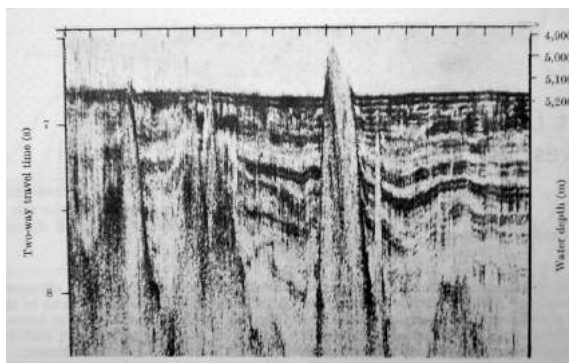


Fig. 6.197. Fotografía de una reflexión sísmica que revela cúmulos de sal en la costa noroeste de Africa. 1969.

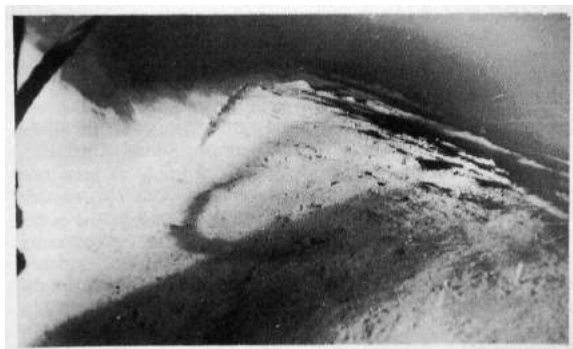


Fig. 6.198. Fotografía del fondo marino para estudios sísmicos, cerca del Estrecho de Gibraltar 1971.

fotografía de estrías, que es aplicada de forma sincronizada con la descarga dentro del líquido. Esta combinación de técnicas es óptima para el estudio de las variaciones producidas en superficie de metales, y de las ondas sonoras propagadas a través de líquidos<sup>332</sup>.

### 6.3.3.5. Los fenómenos de la luz en la imagen de alta velocidad

La imagen de alta velocidad ha sabido aprovechar los efectos producidos por la luz en la misma medida que la microscopía o la astronomía. La polarización, el contraste de fase, los distintos fenómenos de interferencia, el efecto espectroscópico, o aquellos más comunes como la reflexión, la absorción, la transmisión o la refracción, son utilizados por igual en el análisis del movimiento (Figura 6.199). Sin embargo, la fotografía de alta velocidad ha creado en su seno tres aplicaciones básicas a partir de la utilización de la luz paralela como forma de producir los efectos de *silueta* o de *sombra*, de *estrías* y de *interferencia*. Estas tres técnicas consisten en potenciar la observación de las diferencias que se producen en los fluidos o en los flujos, mayormente de gases y de líquidos, sometidos a la acción de frentes de ondas, haciendo uso de las variaciones que se dan en sus densidades, o lo que es lo mismo, en sus índices de refracción. Estos cambios producen figuras o patrones visibles, motivados por la desviación que sufren los rayos de luz a su paso por los gases y los líquidos<sup>333</sup>. La fotografía de sombras nos muestra los cambios producidos en el gradiente de densidad; la de estriaciones, el gradiente de densidad en sí; y la de interferencia, la diferencia de las densidades<sup>334</sup> (Figuras 6.200 a, b y c).

La fotografía de sombras es una de las técnicas primigenias en el estudio de objetos en movimiento, tal como salió a relucir anteriormente con los trabajos de Dvorak y Mach. Es preciso añadir a estos comentarios previos, que la fotografía de sombras utiliza normalmente luz colimada (de rayos paralelos) proyectada sobre el objeto, y que puede hacerse de forma directa, mediante una pantalla, o indirectamente por medio de un condensador. De forma directa, la operación se lleva a cabo en un cuarto oscuro, proyectando directamente la luz sobre el fenómeno, y recogiendo su sombra en la emulsión fotográfica, papel o película, sin ayuda de lentes o condensadores. En este caso se da una proporción de 1:1 entre objeto e imagen, por lo que la película o placa tiene que ser mayor o igual que el objeto a fotografiar. Con una pantalla traslúcida o con un cristal deslustrado, la luz queda proyectada sobre el objeto, y se fotografía su sombra en la pantalla, para lo que se necesita un recinto con luz tenue. Con el método de condensador, se interpone una lente Fresnel, o un condensador, entre la luz y el objeto, y se procede a fotografiar la sombra directamente con la cámara.

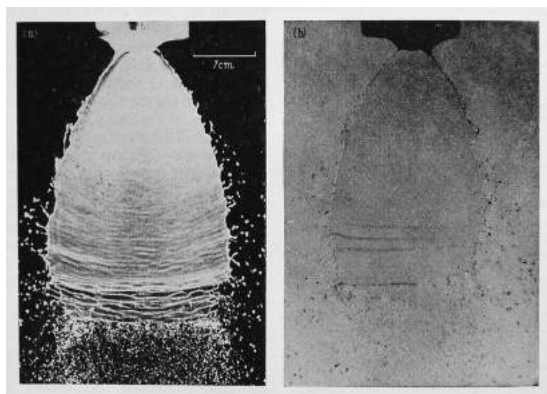
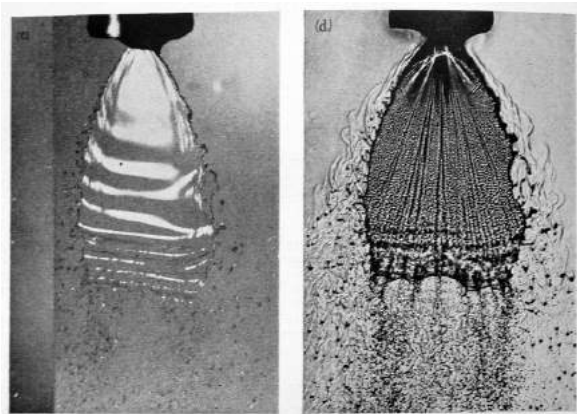


Fig. 6.199. Chorros de un líquido volátil iluminados con reflexión difusa y con transmisión difusa. 1962.

La *fotografía de sombras* proporciona información cualitativa exclusivamente, a diferencia de la de estrías o la de interferencias, que proveen también información de tipo cuantitativo. Por tanto, la visualización de flujos mediante esta técnica es utilizada en gran medida para la observación de la dirección y velocidad de fenómenos pertenecientes al ámbito de los estudios aerodinámicos e hidrodinámicos. Normalmente, este método suele incorporar marcadores al estudio de los fluidos - como tintes, humo,

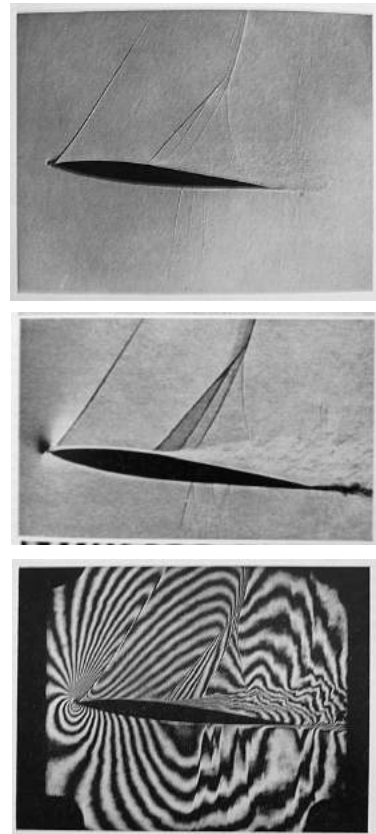
aceite, aire, plásticos, partículas químicas, o recubrimientos- para poder visualizar los resultados. La fotografía de sombras es aplicada mayormente al estudio de chorros de dispersión, de fluidos, fenómenos térmicos, llamas, detonaciones, inmersión e impacto de sólidos en líquidos a velocidades supersónicas, estudios de la disipación de la energía producida por el choque de ondas sobre superficies rugosas, estudio de velocidades de ignición de llamas de gases como el propano o el vapor de benceno; efecto de las corrientes de aire sobre gotas, etc. Cabe la posibilidad de utilizarse también técnicas estereoscópicas en este apartado<sup>335</sup> (Figura 6.201.).

La *fotografía de estrías*, cuya metodología básica ha sido expuesta en páginas anteriores, pasó con el tiempo a emplear dos sistemas ópticos: uno iluminador del campo, y otro responsable del cambio de los índices de refracción o de las densidades del mismo, para producir cambios de luz o de color. Para lograr los cambios de intensidad o de refracción se han empleado regularmente diafragmas o filos cortantes. La acción de éstos da lugar a distintas deformaciones susceptibles de ser fotografiadas. El uso de espejos diseñados originalmente para grandes telescopios, supuso una mejora en la precisión de esta técnica. El proceso de creación de imagen en este caso sigue los siguientes pasos: la luz pasa a través de una ranura fina y, tras ser reflejada por el espejo, atraviesa la muestra, normalmente un objeto transparente; luego, el haz resultante llega a otro espejo que vuelve a reflejarlo en dirección a la cámara, no sin antes haber sido convenientemente refractado por un filo cortante que está situado en el punto focal. La figura producida por la difracción, en forma de bandas de luces y sombras nos da a conocer con gran precisión las diferencias de densidad y de espesor del objeto. Es costumbre, colocar la mano en el plano del objeto una vez que el patrón de estrías está formado para comprobar la estriación producida por las corrientes de aire caliente despedidas por la mano<sup>336</sup>. Este es el mismo fenómeno que observó en su día Foucault, y que todos en algún momento hemos dividido en las emanaciones producidas en la lejanía por el asfalto caliente de una carretera.



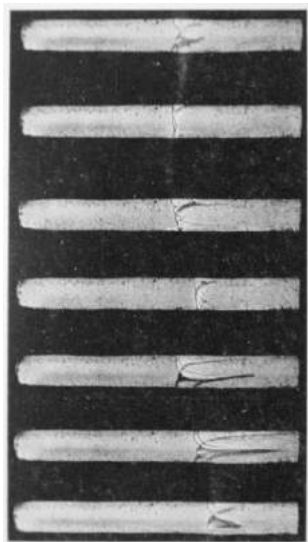
*Fig. 6.201. Chorros de líquido volátil fotografiados con luz especular reflejada, y con luz de sombra, respectivamente. 1962.*

*Fig. 6.200 a, b y c. Fotografías de un flujo supersónico alrededor de un plano aerodinámico iluminado con técnica de sombras, de estrías y de interferencias, respectivamente. Exposición de un microsegundo.*



El montaje de esta técnica puede ganar en complejidad haciendo que la luz complete todo el proceso una o dos veces más. De este modo, su aplicación se extiende a fotografía fija de luz continua, o de luz de flash, a cine convencional y de alta velocidad, con la posibilidad de incorporar técnicas de fotografía en color, o de





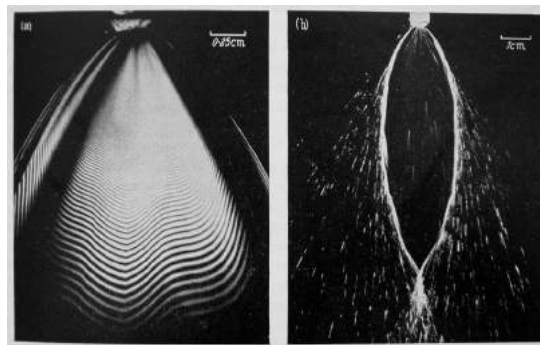
*Fig. 6.202.  
Fotografías  
de estrías de  
una llama  
moviéndose  
en un tubo  
lleno de gas.  
1962.*

efectos estereoscópicos. El montaje, en general, requiere una gran precisión en la disposición de todos sus elementos, especialmente, cuando se quiere obtener información cuantitativa. Los filos cortantes, la fuente de luz, los diafragmas, las parrillas de difracción, los prismas y los filtros de color deben estar perfectamente emplazados, impidiéndose cualquier vibración. Además, las lentes y los espejos utilizados deben estar libres de cualquier aberración o defecto.

La fotografía de estrías es aplicada en el estudio de la propagación de ondas en tubos de choque, de velocidad de los procesos de ignición, de expansión de gases producida por descargas de corta duración, en el análisis de flujos aerodinámicos producidos en túneles de

viento, de saltos hidrodinámicos provocados por generadores de ondas en medios líquidos, de los fenómenos de condensación del vapor de agua<sup>337</sup> en el estudio de los flujos de aire producidos por aeronaves, del flujo de gases y líquidos sometidos a diferentes temperaturas, en la mezcla de gases y líquidos, en el movimiento de las ondas sonoras, o en la examinación de cristales (Figura 6.202).

Por último, la *fotografía de interferencias* aprovecha este fenómeno producido por las ondas luminosas para la captación de fenómenos en movimiento. Se trata de dividir un haz luminoso en dos, para posteriormente recombinarlo y observar si se producen franjas de interferencias. Esta técnica aporta información suficiente como para poder cuantificar las diversas densidades presentes. Es una técnica más complicada que las anteriores, requiriendo una mayor precisión en sus procedimientos. Las diferencias de densidad de la muestra - indicativas de las diferencias de sus respectivos índices de refracción- provocan desplazamientos de las bandas de interferencia de forma proporcional. A diferencia de la técnica de sombras y de estrías, utilizadas mayormente en el análisis de sustancias en movimiento rápido, la de interferencia se aplica a movimientos lentos y continuos. La fotografía de interferencia es una herramienta óptima para el análisis de las propiedades físicas de los objetos, en particular de las líneas de tensión y de las desviaciones más diminutas que puedan ocurrir en la posición o en el grosor de los materiales. Esta capacidad la convierte en una técnica de alta precisión para el análisis de movimientos muy dilatados en el tiempo. (Figura 6.203.).



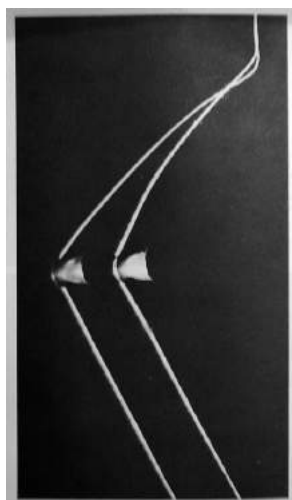
*Fig. 6.203. Desintegración de películas de líquido laminar, vistas con interferogramas a una centésima de segundo, y a una milésima de segundo, respectivamente. 1962.*

#### **6.3.3.6. La velocidad del objeto**

A lo largo de los apartados precedentes hemos comprobado cómo las diferentes técnicas de alta velocidad se adaptan, mejor o peor, a determinados fenómenos y objetos, dependiendo si la naturaleza de ellos responde a los cuatro



**Fig. 6.204.**  
*Impacto de un  
 plomillo sobre una  
 cuerda con sistema  
 de flash para dos  
 exposiciones.*  
*Velocidad del  
 proyectil: 125  
 metros/sec; a una  
 distancia de 10  
 cm; lo que  
 equivaldría a 1250  
 m/s a una  
 distancia de 1  
 metro. 1965.*

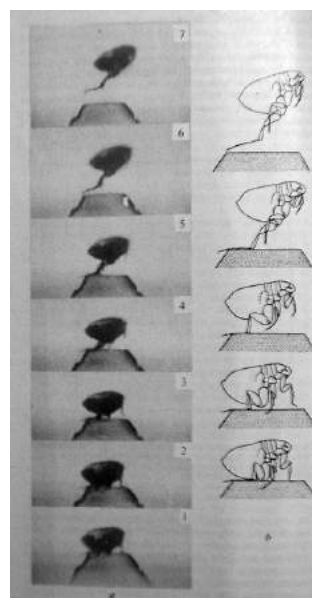


estados fundamentales de la materia: sólido, líquido, gas o plasma. Un quinto estado reivindicado para los cristales líquidos queda fuera de los límites de este estudio, aún cuando cobra en la actualidad una significación especial dentro de las técnicas de proyección de imágenes (pantallas y paneles LCD). Una opción adicional para delimitar el campo de aplicación de la fotografía de alta velocidad, aparte del relativo a las velocidades de obturación, es atendiendo a la velocidad del objeto. Bajo este criterio, contaríamos entonces con que la imagen de alta velocidad quedaría definida por aquella disciplina científica dedicada al estudio de objetos y fenómenos que se

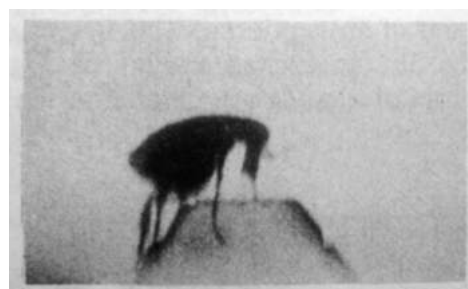
producen a velocidades comprendidas entre unos cientos de metros por segundo y diez mil o más metros por segundo<sup>338</sup>.

Independientemente del estado material que presenta el objeto de estudio, su tamaño es también un factor de vital importancia en estas tareas. La nitidez de las imágenes mantiene una relación muy estrecha tanto con el tamaño del objeto como con la distancia que éste guarda respecto de la cámara. En este sentido, la velocidad angular del objeto respecto de la lente es uno de los elementos más determinantes; de aquí, que fotografiar un objeto diminuto a una distancia corta presente más dificultades que uno de gran tamaño a distancia larga, o que la capacidad de fotografiar objetos a altas velocidades aumente a medida que esta distancia es acrecentada<sup>339</sup>.

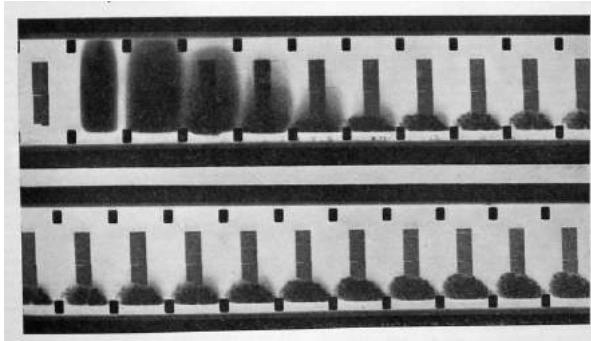
En este orden de cosas, la aplicación de las técnicas de alta velocidad al estudio microscópico ha contado con notables avances a lo largo del siglo pasado. Entre los trabajos más sobresalientes, destaca el estudio del flujo sanguíneo mediante técnicas cinematográficas aplicadas al microscopio, con utilización de marcadores<sup>340</sup>; el análisis del cambio estructural de los músculos en el proceso de contracción, mediante técnicas de interferencia aplicadas a fotografía por disparo múltiple de flash y a cinematografía<sup>341</sup>; la observación del proceso de formación de cristales de hielo en presencia de campos eléctricos<sup>342</sup>, del movimiento de pequeños animales acuáticos con técnica de disparo múltiple de flash y obturador abierto<sup>343</sup>, del salto de insectos con técnicas cinematográficas de alta velocidad<sup>344 y 345</sup> (Figuras 6.204; 6.205 y 6.206), o de la movilidad de bacterias, mediante técnica de contraste de fase e imagen de vídeo transferida posteriormente a cine<sup>346</sup>. Por su parte, la microscopía electrónica se ha aplicado también al estudio de cuerpos en movimiento a escalas muy reducidas, como es el caso de procesos de dislocación del grafito. En este caso, se ha empleado el registro cinematográfico (16 mm),



**Fig. 6.205.**  
*Salto de la  
 pulga de la  
 rata  
 oriental.*  
 1972.



**Fig. 6.206.**  
*Detalle. de  
 la anterior*  
 1972.



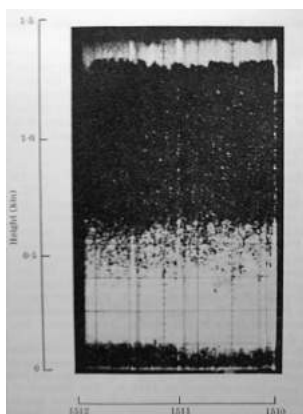
**Fig. 6.207.** Fotografías de alta velocidad de frentes de ondas producidos por explosiones en el espacio, realizadas con sistemas de detección por láser y cámara Fastax. 3.750 fps. 1966.

directamente desde la pantalla fluorescente del microscopio<sup>347</sup>.

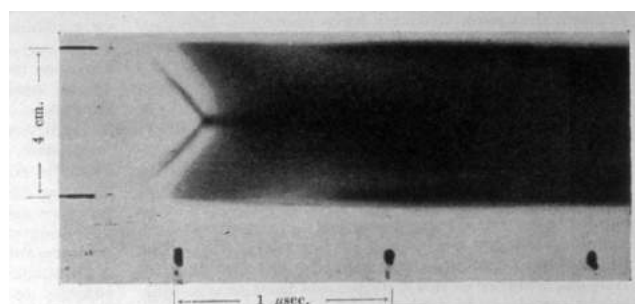
En el ámbito de la astronomía, huelga decir que gran parte de los fenómenos que quedan bajo su competencia, responde a cuerpos en movimiento veloz y continuo. Si bien la distancia a la que se encuentran favorece la aplicación de las técnicas fotográficas y cinematográficas convencionales, existen multitud de fenómenos que han demandando técnicas próximas a las de alta velocidad. Es el caso de fenómenos atmosféricos de tipo eléctrico, lluvias

de meteoros, fulguraciones solares, lanzamiento y trayectorias de naves y satélites enviados al espacio, o ensayos de explosiones de gases a grandes alturas<sup>348</sup>, en este caso llevados a cabo con cámaras de alto rendimiento del tipo Fastax o Schackman, y tecnología de detección por láser<sup>349</sup> (Figura 6.207.). En este contexto, es digno de mencionar también la tecnología radio aplicada a fenómenos fugaces, la producción de imágenes térmicas de fenómenos atmosféricos (Figura 6.208.), o la identificación de cuerpos celestes como los púlsares con tecnología de generación de pulsos de radio, o de rayos X.

Por último, deir que el objetivo de la fotografía de alta velocidad cobró nuevas dimensiones al entrar en el campo de observación de los plasmas. Recordemos que este cuarto estado de la materia fue señalado por primera vez por Crookes a finales del siglo XIX, como un fenómeno perteneciente a la *radiometría*, rama científica que él mismo propuso y que estaría dedicada al estudio general de las radiaciones. Posteriormente, los plasmas fueron estudiados y definidos con mayor exhaustividad por Langmuir, bautizándolos con su nombre actual en 1928 (ver Cap. 3.2.). A principios de los cincuenta, los dispositivos toroidales construidos en el ámbito de la investigación termonuclear (ver Cap. 4.3.3.) para la producción de efectos de compresión de plasmas (Zeta, Sceptre, Scylla), potenciaron el estudio de fenómenos de alta velocidad en el contexto de estos gases ionizados y sometidos a campos magnéticos de gran intensidad. Las técnicas fotográficas y oscilográficas se aplicaron abundantemente en la observación de este plasma termonuclear y de la emisión de neutrones<sup>350 y 351</sup>. La espectroscopía de resolución temporal, apoyada en el uso de células Kerr, convertidores de imagen, centelleadores y osciloscopios, fueron determinantes para el estudio de las descargas emitidas en forma de pulsos de corta duración, particularmente para determinar los momentos de producción de neutrones durante el proceso de contracción del plasma<sup>352, 353, 354 y 355</sup>. (Figura 6.209).



**Fig. 6.208.** Señales de radar referentes a medidas térmicas en la troposfera. 1969.



**Fig. 6.209.** Fotografía de barrido del choque producido por dos ondas en el reactor termonuclear Zeta. 1959.

### 6.3.3.7. Características de la imagen

Si el tamaño del objeto es importante en este tipo de imagen, el tamaño de la imagen respecto de éste, o lo que es lo mismo los niveles de aumentos que son precisos para su observación, es un factor tan crucial como la propia velocidad del mismo. Lógicamente, un objeto de grandes proporciones permite exposiciones más largas que uno pequeño; o el grado de aumento aplicado para crear una imagen óptima de este tipo, guarda una relación inversa con la velocidad del objeto. Este tipo de condicionamientos lo comprobamos fácilmente cuando miramos un objeto a través de un microscopio: los movimientos pertenecientes a los pequeños detalles aparecen, en términos relativos, mucho más rápidos de lo que son en realidad.

La conquista continuada de mayores velocidades de obturación, de arrastre de película y de disparos de flash, tanto de luz visible como de rayos X, ha obligado a una reducción del tamaño de la imagen en numerosas aplicaciones. En este contexto, es preciso recordar que si los formatos de los encuadres de los fotogramas en las aplicaciones comerciales de la fotografía y el cine (como de la pintura<sup>356</sup>), no han llegado a decidirse por unas proporciones determinadas y estandarizadas (1.33; 1.15; 1.7; 1.618 (rectángulo de oro), etc.), lo mismo ocurre en ciencia y en fotografía de alta velocidad, donde se da prioridad a la captación del fenómeno de estudio por encima de cualquier encuadre preestablecido.

Esta interdependencia entre la velocidad y el tamaño de las imágenes nos demuestra que existe a su vez una relación muy estrecha entre estos dos parámetros y la resolución óptica que queremos conseguir en la imagen resultante. Si medimos este tipo de resolución en términos de pares de líneas de blanco y negro que pueden ser diferenciados en un fotograma<sup>357</sup>, comprendemos que dividir en parcelas el encuadre de un fotograma, o utilizar una película muy pequeña con el fin de obtener mayores velocidades de exposición, traerá cuenta siempre que se tome en consideración la cantidad de información (o de nitidez) que contenga la imagen, y que es necesaria para el ensayo científico en cuestión. La fabricación de emulsiones de grano fino ha sido muy importante en este afán por lograr mayores niveles de resolución en imágenes reducidas. En definitiva, hay que buscar un punto de equilibrio entre la velocidad que se quiere captar del objeto y la calidad de la imagen resultante; o lo que es lo mismo, entre la resolución temporal y la espacial<sup>358</sup> (Figura 6.210.).

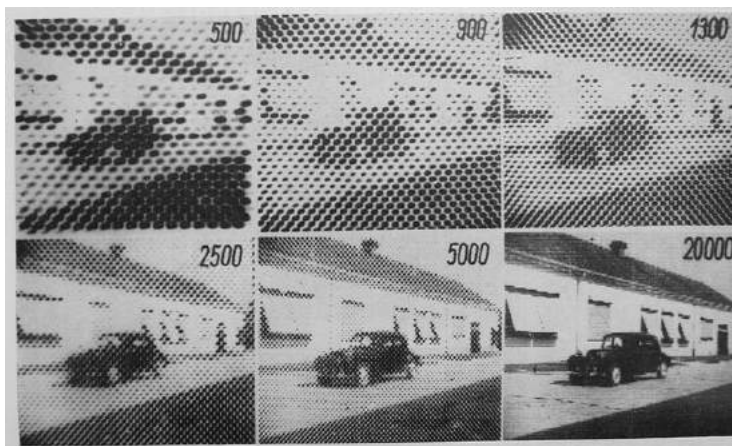


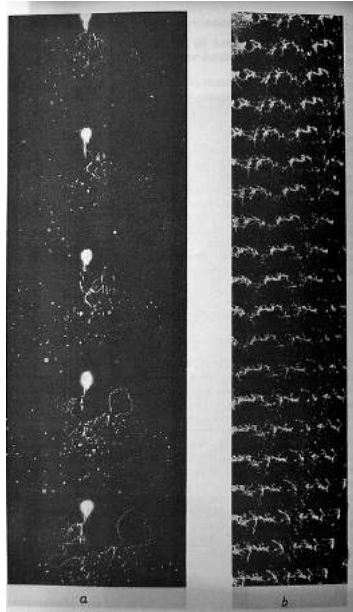
Fig. 6.210. Fotografías tomadas a distintas resoluciones, indicando el número de bloques en que quedan divididas..

El concepto de *resolución temporal* de la imagen es hoy día un concepto determinante en los sistemas de producción de imágenes, especialmente desde la llegada de los sensores de estado sólido en los que el tiempo de integración para la formación de imágenes ha dejado de depender de los sistemas de obturación convencionales, para ser una función controlada por el propio sensor. Si la resolución óptica, entendida como la capacidad que tiene un sistema para producir

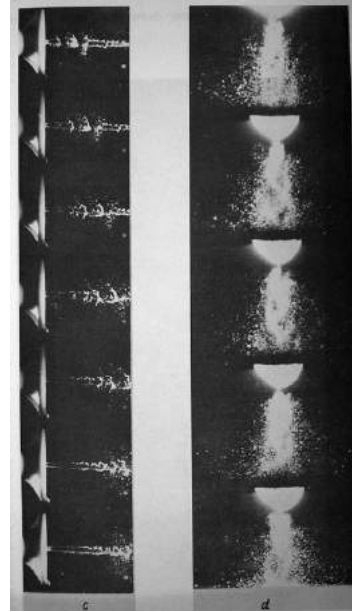


imágenes con el mayor detalle posible, es un concepto proveniente mayormente del ámbito de la microscopía, el de resolución temporal nace fundamentalmente de las aplicaciones de la imagen de alta velocidad, entendido como la habilidad que tiene un sistema fotográfico para reproducir imágenes relativas a los instantes más cortos posibles del movimiento de un objeto (Figuras 6.211; y 6.212.).

La imagen de alta velocidad queda completada con la posibilidad de realizar fotografías estereoscópicas, preferentemente para aquellas investigaciones donde la tridimensionalidad de las imágenes es encomiable e imprescindible. ( Ver figura 2.38).



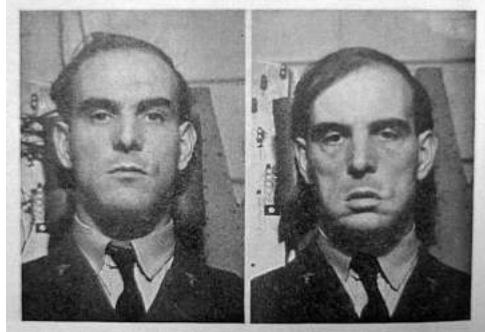
*Fig. 6.211. a) Cuatro fotogramas de un chorro de aspersión con baja resolución pues no se ve la secuencia completa, 5.000 flashes/sec. b) Flujo de agua a alta presión, 25.000 flashes/sec, buena resolución. Tiempo de exposición 0.2 nanosegundos. 1965.*



*Fig. 6.212. c) Fluido de agua a alta presión, 16 mm film a 6.000 flashes/se. d) Flujo de fuel a 4.000 flashes por segundo. 1965.*

#### 6.3.4. La imagen simulada

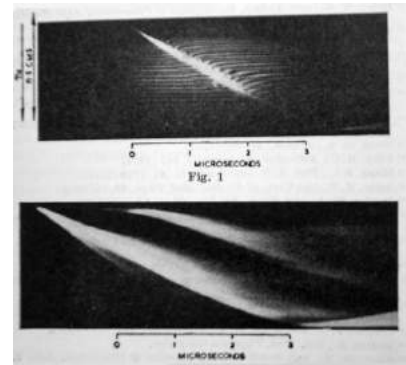
La incorporación de los ordenadores digitales al procesamiento de la información de datos e imágenes a partir del final de la segunda guerra mundial, supuso un revulsivo para las tareas de lectura y evaluación de las series interminables de fotogramas producidos por las técnicas de alta velocidad. Para mediados de los cincuenta, uno de los problemas más acuciantes fue precisamente cómo procesar este tipo de información<sup>359</sup>. Desde entonces, el análisis de las fotografías, de hacerse ocularmente y con técnicas de recuento manual, pasó a realizarse con ordenadores cada vez más reducidos de tamaño y asequibles, así como con la ayuda de rejillas micrométricas y técnicas de proyección<sup>360</sup>. En este proceso, la nueva generación de miniordenadores se aplicó a las labores de almacenamiento y procesamiento de las imágenes, y a la creación de un nuevo universo que desembocó con el tiempo en lo que conocemos como *imagen artificial*. En este contexto, las *técnicas de simulación* han sido de especial ayuda para la creación de imágenes virtuales de cuerpos fugaces. La inaccesibilidad a cierto tipo de fenómenos, ya



*Fig. 6.213. Efectos fisiológicos en sujeto sometido a fuerza centrífugadora de alta velocidad.*



sea por su lejanía, su peligrosidad, o por tener sus orígenes en épocas pretéritas, potenció el desarrollo de técnicas de suplantación de los hechos con procesos simulados en laboratorios. Los simuladores de vuelo y técnicas afines en el ámbito de la aeronáutica<sup>361</sup> (Figura 6.213.), fueron tal vez los primeros intentos de poner en práctica este nuevo tipo de imagen. Estos hechos coincidieron con otros proyectos de simulación no menos importantes, como los de defensa antiaérea contra misiles intercontinentales (Red SAGE), origen de las actuales *autopistas de la información*. Estos mismos autómatas fueron responsables también de las tareas de codificación, almacenamiento y cómputo aplicadas a toda suerte de imágenes. Recordemos que fue el sector aeroespacial el máximo responsable de la llegada del procesamiento digital de la imagen, presionado por la ingente producción de imágenes provenientes de las misiones espaciales (ver Cap. 6.1.2.6.). El concepto de información comenzó a calar muy hondo en el campo de la imagen, hasta el punto de convertirse en el parámetro delimitador de variables como la definición, el contraste o la borrosidad de las mismas.



**Fig. 6.214.** *Fig. 1. Fotografía de barrido de bandas de interferencia relativas al movimiento de un plasma superimpuesto en la misma emulsión. Fig. 2. Fotografía de barrido de plasma sin bandas de interferencias. 1962.*

En la imagen de alta velocidad comenzaron a ser frecuentes los ensayos de laboratorio destinados a simular fenómenos de difícil acceso a la instrumentación. Tal fue el caso de estudios emprendidos sobre el comportamiento de gases interestelares, auroras boreales, o corrientes de partículas solares afectadas por el campo magnético terrestre por medio de la aplicación de técnicas de alta velocidad

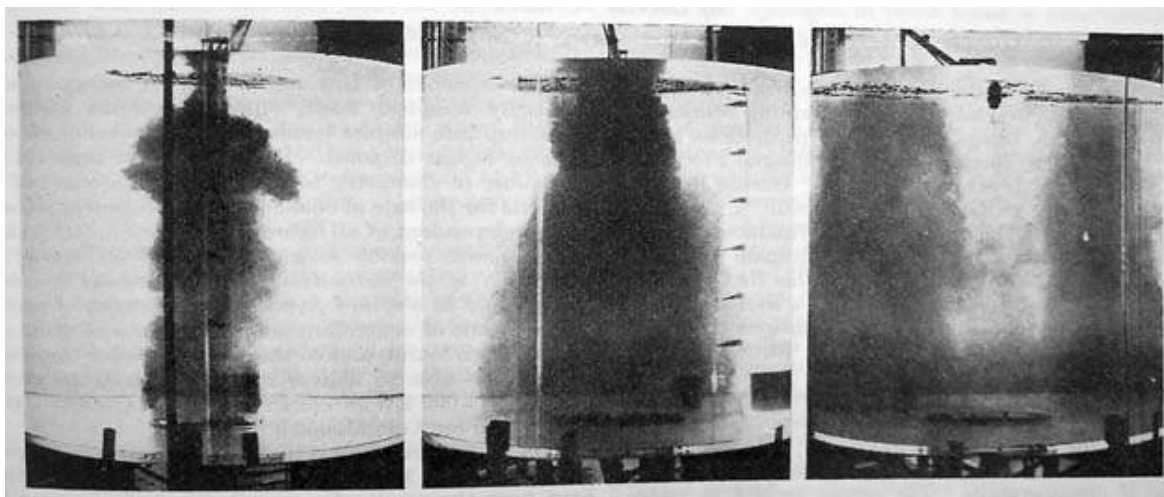


**Fig. 6.215.** *Fotografía de barrido de un vórtice. 1963. de la arteria de una rana con un dispositivo de fibra óptica. 1961.*

a plasmas producidos en ambientes controlados<sup>362,363 364</sup> (Figura 6.214.). O también, se llevaron a la práctica estudios de fenómenos atmosféricos en forma de vórtices, tales como tornados, huracanes, tormentas y remolinos, mediante técnicas cinematográficas de barrido aplicadas a chorros a propulsión producidos en tanques estacionarios y rotatorios, emplazados en laboratorios<sup>365</sup> (Figuras 6.215; y 6.216), y de fenómenos de propagación no lineal de ondas, flujos supersónicos y fluidos en túneles de vientos dentro del ámbito del desarrollo de armamento<sup>366</sup>.

### 6.3.5. La fotografía de lapsus de tiempo

Los movimientos de los objetos, contemplados desde las técnicas de análisis del movimiento, quedan divididos en cíclicos y no cíclicos; y dentro de estos últimos, en regulares e irregulares. Respecto de las técnicas de exposición de los materiales fotosensibles, hemos visto cómo la imagen resultante viene determinada por la velocidad del objeto, el tamaño de la imagen y la cantidad de fotogramas o imágenes que se quiere registrar del mismo. El factor movimiento, por tanto, está presente tanto en el objeto como en el aparato de observación. Esta relación condiciona las distintas técnicas utilizadas para exponer y hacer visibles



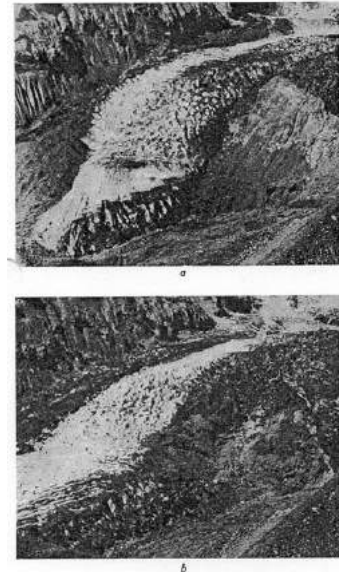
*Fig. 6.216. Fotografía de barrido de un vórtice. 1963.*

los objetos de estudio. Exposiciones únicas y múltiples, imágenes simples o superpuestas, película fija o en movimiento, son posibilidades que enriquecen enormemente este tipo de técnicas. A su vez, la imagen del movimiento de los objetos puede estar referida a los movimiento ultra veloces, o a aquellos que se producen muy lentamente, en periodos de tiempo muy extensos. El estudio de la rigidez del planeta, que A. A. Michelson llevó a cabo a principios del último siglo con técnicas interferométricas y exponiendo lentamente una película durante un año, es un claro precursor de este tipo de estudios<sup>367</sup>. A lo largo del siglo XX, la fotografía de *lapsus de tiempo*, ha generado técnicas muy diversas. La más simple tal vez responda al empleo de una cámara fija sobre trípode, encargada de realizar múltiples exposiciones con la ayuda de un control automático por emisión de pulsos, o con mecanismos de relojería. Los resultados de la aplicación de esta técnica tan simple han sido prolíficos; valga entresacar los estudios llevados cabo sobre el comportamiento de organismos vivos como plantas<sup>368 y 369</sup>, insectos<sup>370 y 371</sup>, bacterias, células<sup>372</sup>, bacilos, en ocasiones bajo el efecto producido por la administración de medicamentos<sup>373</sup>; de procesos de sedimentación<sup>374</sup>, o del comportamiento de ciertos tejidos corporales<sup>375</sup>. Todo ello, se ha llevado a la práctica con el uso de cámaras cinematográficas programadas para filmar a razón de cierto número de fotogramas por unidad de tiempo, o con cámaras fotográficas convencionales disparadas cada cierto tiempo, con la participación de obturadores tipo Kerr, o de flashes de diversa índole. También se han ideado dispositivos fotográficos para el seguimiento del vuelo de las aves durante periodos largos de tiempo, con técnicas de exposición programadas automáticamente y acopladas a las extremidades de las propias aves<sup>376</sup>. En el campo de la fisiología y de la psicología se han puesto en práctica multitud de técnicas de registro del comportamiento de sujetos sometidos a intervenciones, a situaciones de privación, o con presencia de tics nerviosos<sup>377</sup>.

Como señalé anteriormente, los estudios de fenómenos a través de periodos prolongados de tiempo se verán profundamente afectados por el valor que la sociedad en general y la ciencia en particular otorgue a los archivos gráficos documentales, cuyas piezas serán de vital importancia a la hora de comprender multitud de fenómenos. Las fotografías del pasado encierran un valor incalculable para la ciencia, en la misma medida que los documentos y piezas guardados en bibliotecas y museos. Sirvan de ejemplos los estudios geocronométricos basados en los rasgos más definitorios de determinados fósiles a partir del análisis de fotografías tomadas recientemente y comparadas con otras tomadas del mismo objeto en el pasado<sup>378</sup>. O el estudio del movimiento de glaciares, como el Nisqually,

donde fotografías de archivos de 1890 y de 1944 han sido de gran utilidad para comprender los procesos de ensanchamiento y estrechamiento sufridos a lo largo de los años, hecho crucial a la hora de determinar la existencia de un cambio climático en nuestro planeta<sup>379</sup> (Figura 6.217.). En este contexto, es importante resaltar el papel fundamental que desempeña la fotografía y el cine documental de carácter histórico, antropológico y social con la creación continuada de un archivo iconográfico que con toda seguridad prestará un gran servicio a las futuras generaciones de científicos.

*Fig. 6.217. Fotografías del glaciar Nisqually, de 1958, y 1965, respectivamente, para estudios de su ensachamiento, trazos, avance, etc; para estudios sobre el cambio climático en nuestro planeta.*



En el ámbito de la fisiología y la psicología, el movimiento de los objetos y de las propias imágenes desempeñan un papel determinante, de manera especial en lo que concierne a la observación como parte del método científico. Que duda cabe que los trabajos de Mach sobre imagen de alta velocidad e imagen estereoscópica influyeron decisivamente en su teoría del conocimiento. La percepción, tal como han señalado los psicólogos de la Gestalt, es un proceso muy dependiente del movimiento de los objetos y del propio sistema sensorial humano. La motricidad, desde la infancia, es inseparable de la percepción. Han sido numerosas las investigaciones dirigidas a comprobar el efecto ilusorio de movimiento, producido por determinadas imágenes<sup>380</sup>, la incidencia de los movimientos oculares, como el parpadeo, en el proceso de observación científica<sup>381</sup>, o los efectos producidos por las imágenes cinematográficas en la fisiología y psicología humanas. El nivel de confianza puesto por la ciencia y la filosofía en nuestros sentidos ha marcado el curso de las discusiones epistemológicas durante siglos. La observación y medición de los fenómenos veloces forman un par indisoluble en numerosas ramas científicas.

Por último, indicar que el universo de la imagen de alta velocidad está íntimamente ligado al de *velocimetría*, o técnica de medición de los fenómenos fugaces. Observación y medición en este contexto forman un binomio irresoluble



*Fig. 6.218. Cámara de destellos para el estudio de radiaciones cósmicas. 1999.*

donde es difícil hacer una delimitación precisa del campo de competencias de cada una de ellas. Los procedimientos cuantitativos como resultado del análisis de las imágenes hacen esta delimitación aún más difícil. A ello se une, la proliferación de gran cantidad de detectores en los que los datos cuantitativos se mezclan con facilidad con los aspectos visuales. La amplia gama de detectores de partículas desarrollados a partir del final de la última gran guerra, ha dado lugar a una nueva etapa caracterizada por la fusión de estos dos parámetros esenciales del método científico: medición y observación. La cámara de burbujas, en este sentido, representa tal vez el instrumento que cierra una etapa dominada por la imagen fotográfica de sales de plata, dando paso a una nueva instrumentación en la que los procesos de visualización y de medición quedan más integrados. Los detectores de partículas y de radiaciones, nacidos de la experiencia adquirida por el contador Geiger, las *cámaras de ionización* y los *centelleadores*, han dado paso a la

*cámara de destellos* (Spark Chamber) (Figura 6.218), la *Wire Chamber*, la *Multiple Wire Proportional Chamber* (MPWC), la *Drift Chamber*, la *cámara de proyección en el tiempo* (Time Projection Chamber), detectores como el *RICH* (Ring Imaging Cherenkov), o instrumentos como el *PIV* (Particle Imaging Velocimetry), el *PTV* (Particle Tracking Velocimetry) o el *LDV* (Laser Doppler Velocimetry). En este proceso de relevo de una tecnología de la imagen, como es la fotográfica de sales de plata, por otra de funcionamiento digital, ha sido decisiva esta confluencia de intereses por encontrar en la ciencia un camino común a las herramientas de visualización y medición de los fenómenos. La alta resolución y contraste de la fotografía clásica no han sido suficientes para competir con un nuevo tipo de imagen que añade a esas virtudes la posibilidad de controlar cualitativa y cuantitativamente las unidades mínimas de las que está formada. Un nuevo universo iconográfico se ha abierto para la ciencia y la humanidad lleno de posibilidades e incertidumbres. La fotografía de las sales de plata, tras un siglo y medio de grandes y exclusivas aportaciones a la ciencia, ofrece el testigo a un nuevo tipo de imagen tecnológica, como es la digital, encargada de documentar y representar el nuevo momento histórico que se avecina para la ciencia y el conjunto de la sociedad.



## Notas del capítulo 6.

- 1 Op. cit. Jeans. p 140.
- 2 Moholy-Nagy, L. *La Nueva Visión*. Buenos Aires, Ed. Infinito, 1985. [“Von Material zur Architektur”, 1929]. Y Del pigmento a la luz (1936) En *Estética fotográfica*. Ed. Joan Fontcuberta. Gustavo Gili 2003. p 193.
- 3 Stephenson, F. R. *The Earliest Known Record of a Solar Eclipse*. Nature. 14 de noviembre de 1970. p 651.
- 4 Op. cit. Hey. p 140.
- 5 Ibid. p 145.
- 6 Needham, J; Ling, W; y Price, D. J. *Chinese Astronomical Clockwork*. Nature. 31 de marzo de 1956. p 600 y ss.
- 7 Cruikshank, Dale P. *Possible Luminiscence Effects on Mercury*. Nature. 12 de febrero de 1966. p 701.
- 8 Un desarrollo exhaustivo de las técnicas de observación y de registro de imágenes, utilizadas en el campo de la astronomía, hasta 1927, puede consultarse en mi anterior trabajo Op. cit. Cuevas.
- 9 Sagan, Carl, y Pollack, James B. *On the Nature of the Canals of Mars*. Nature. 8 de octubre de 1966. p 117 y ss.
- 10 *Some Developments in Astronomical Instruments*. Nature. 3 de septiembre de 1949. p 387.
- 11 Thomas, G. M. *Auroral photography Using All Sky Cameras*. The Journal of Photographic Science, Vol. 8, 1960. p 55 y ss.
- 12 Op. cit. Ilford. p 16.
- 13 Newkirk, G. y Lacey, L. *Eclipse not Spoilt by Shortage of Funds*. Waldmeier, M. Swiss Solar Eclipse Expedition to Mexico. Y Koutchmy, S. Laffineur, M. *Photometric Study of the Solar Corona*. Nature. 20 de junio de 1970. p 1097; 1039, y 1041, respectivamente.
- 14 Baker, E. A. y Smyth, M. J. *Recent Advances in the Application of Photography to Astronomy*. The Journal of Photographic Science, Vol. 3, 1955. p 44.
- 15 Ibid. p 46.
- 16 Ibid, p 48.
- 17 P.S. y G. G. *Impact of TV sensors on Astronomical Research*. Nature. 1 de febrero de 1974. p 251- 2.
- 18 Howell, S. B. *Handbook of CCD Astronomy*. Cambridge Univ. Press. 2000. p 4.
- 19 Antonioni. Michelangelo. El desierto rojo.
- 20 White, E. L. C. *Automatic Recording of Heaviside Layer Heights*. Nature. 16 de abril de 1932. p 579.
- 21 Kraus, J. D; y Ko, H. C. *A Detailed Radio Map of the Sky*. Nature, 22 de enero de 1955. p 159.
- 22 Este fenómeno, que da lugar a emisiones de radio muy intensas, fue interpretado de esta manera por los físicos Alfvén y Herlofson, en 1951. Op. cit. Hey. p 20.
- 23 Ryle, M. *The Mullard Radio Astronomy Observatory*, Cambridge. Nature, 20 de julio de 1957. p 110.
- 24 Op. cit. Hey. p 47.

- 25 Ibid. p 59.
- 26 Kraus, John D. *Distribution of Radio Brightness Across the Andromeda Nebula*. Nature. 19 de marzo de 1955. p 502.
- 27 *Pulsar Flashes Photographed*. Nature. 15 de marzo de 1969. p 998.
- 28 Miller, J. S. y Wampler, E. J. *Television Detection of the Crab Nebula Pulsar*. Nature. 15 de marzo de 1969. p 1037.
- 29 Ibid. p 1038.
- 30 Komesaroff, M. M; McCulloch, P. M; Hamilton, P. A.; Cooke, D. J. *Spectral Fine Structure in Pulsar Radiation*. Nature. 26 de octubre de 1968. p 358.
- 31 Op. cit. Hey, p 172.
- 32 Op. cit. Hawking. p 150.
- 33 Ibid, p 135 y ss.
- 34 Penrose, R. *Black Holes and Gravitational Theory*. Nature; 21 de abril de 1972. p 377.
- 35 Ibid. p 378.
- 36 Burbidge, G.R y Burbidge, E. M. *Quasi- stellar Objects- A Progress Report*. Nature. 4 de octubre de 1969. p 21 y ss.
- 37 Op. cit. Hey. p 211.
- 38 Esta teoría tiene su origen en el descubrimiento del ruido térmico, por J. B. Johnson, en 1928. Este fenómeno es producido por el calor desprendido por los cuerpos celestes, y se detecta en la calidad de las señales recibidas por las antenas. Este tipo de ruido, que se aprecia fácilmente por la acción de la tierra, o por la proximidad del sol, fue el que detectaron Penzias y Wilson, procedente de varios puntos lejanos del espacio. Su uniformidad y su temperatura constante de 3 grados K, les hicieron pensar que se trataba de un vestigio de la gran explosión que dio origen al universo.
- 39 Sougez. Marie- Loup. *Historia de la fotografía*. Cátedra 1991. p 166.
- 40 Op. cit. Eder. History of. p 394.
- 41 Ibid. p 396.
- 42 Laws, F. C. V. *Aeronautical Photography*. En Op. cit. Photography as a Scientific Implement. p 402.
- 43 Blackwell, D. E; Dewhirsts, D. W; y Dollfus, A. *Solar Granulation and its Observation from a Free Balloon*. Nature. 3 de agosto de 1957. p 211 y ss.
- 44 Op. cit. Eder. History of... p 397.
- 45 Op. cit. Eder. History of... p 397.
- 46 Boyd, R. L. F. *Celestial Laboratories*. Nature. 6 de abril de 1963. p 4.
- 47 Ibid. p 4.
- 48 Boyd, R. L. F; Groves, G. V, y Bowen, P. J. *Photography and Rockets*. The Journal of Photographic Science, Vol. 8, 1960. p 48 y ss.
- 49 Friedman, H. *Twenty-five Years of Rocket and Satellite Astronomy*. Nature. 26 de noviembre de 1971. p 181.
- 50 Russell, P. C. *Soft X-ray Image of the Sun*. Nature, 13 de febrero de 1965. p 684.
- 51 Pressey, B. G. *Rocket and Satellite Instrumentation*. Nature 22 de octubre de 1960. p 265.
- 52 Groves, G. V. *Upper-Atsmosphere Wind Studies by Skylark Rocket Sodium Experiment*. Nature. 17 de septiembre de 1960. p 1001.
- 53 Black, W. S; Booker, D; Burton, W. M; Jones, B. B; Shenton, D. B; y Wilson, R.

- Solar Spectroscopy in the Extreme Ultra- Violet Using Stabilized Skylark Rockets.* Nature. 15 de mayo de 1965. p 654.
- 54 VV. AA. *Rocket UV Flash Spectra from the Solar Eclipse of March 7, 1970.* Nature; 18 de abril de 1970. p 249 y ss.
- VV.AA. *Solar UV Flash Spectrum 1400 Å- 1960 Å.* Nature; 22 de agosto de 1970. p 32 y ss.
- VV. AA. *Rocket Observation of the Corona on March 7, 1970.* Ibid. p 35 y ss.
- 55 Bates, B; Bradley, D. J; McKeith, C. D; y McKeith, N. E. *Fabry- Perot Interferograms of the Solar Mg II Doublet and XUV Solar Images Obtained during Stabilized Skylark Rocket Flight.* Nature. 11 de octubre de 1969. p 161 y ss.
- 56 Op. cit. Boyd. *Celestial...* p 7.
- 57 Op. cit. Pressey. p 266.
- 58 Op. cit. Boyd. ... and Rockets. p 51.
- 59 Personal del Royal Aircraft Establishment, de Fanborough. *Observations on the Orbit of the Russian Earth Satellite.* Nature; 9 de noviembre de 1957. p 937 y ss.
- Personal de la Jodrell Bank Experimental Station, de la Universidad de Manchester. *Radar Observations of the First Russian Earth Satellite and Carrier Rocket.* Ibid. p 941 y ss.
- Rocket of the First Earth Satellite.* Ibid. p 944.
- 60 Op. cit. Friedman. p 182.
- 61 Pounds, K. A. *Recent Developments in X-ray Astronomy.* Nature; 29 de enero de 1971. p 303 y ss.
- 62 Editorial. Nature. 24 de agosto de 1963. p 743.
- 63 [www. history.nasa. gov](http://www.history.nasa.gov).
- 64 Ibid.
- 65 Saidey, F; Morgan, W. A; y Wark, D. Q. *Determination of Cloud Altitudes from Gemini- Titan 5.* Nature; 20 de noviembre de 1965. p 775.
- 66 Ney, E. P; y Pepin, T. J. *Observations on Stellar Axtintion obtained in the Gemini 9 Space Flight.* Nature; 24 de septiembre de 1966; p 1382.
- 67 Op. cit. Del semáforo... p 335.
- 68 Smalley, V. G; y Ronca, L. B. *Structures Inside a Lunar Crater Photographed by Ranger VII.* Nature; 4 de diciembre de 1965. p 930 y ss.
- 69 Fielder, G. *Photographs of Mars taken by Mariner IV.* Nature; 25 de septiembre de 1965. p 1381.
- 70 Editorial. *Mars Still Mysterious.* Nature, 9 de agosto de 1969. p 561.
- 71 McCall, G. J. H. *Implications of the Mariner IV Photography of Mars.* Nature, 24 de septiembre de 1966. p 1384.
- 72 Editorial. *Mariners Reach Mars.* Nature; 26 de julio de 1969. p 343.
- 73 Ronca, L. B. *Structure of the Crater Alphonsus.* Nature; 8 de enero de 1966. p 182.
- 74 Bastin, J. A. *Small Scale Lunar Roughnes.* Nature; 8 de octubre de 1966. p 171 y ss.
- 75 Davies, J. G; Lovell, O. B. E, Pritchard, R. S; y Smith, F. G. *Observations of the Russian Moon Probe Luna 9.* Nature; 26 de febrero de 1966. p 848.
- 76 Fielder, G; Wilson, L. y Guest, J. E. *The Moon from Luna 9.* Nature; 26 de febrero de 1966. p 851.
- 77 Astronomy Correspondent. *Album of the Moon.* Nature; 4 de enero de 1969. p 4 y ss. Y *First Look at the Apollo 8 Pictures.* Ibid. 18 de enro de 1969.

- 78 Op. cit. nasa.
- 79 Op. cit. Hoadley, en Neblette's Handbook. p 596.
- 80 Op. cit. Baines, p 289.
- 81 Gonzalez, Rafel C. Wintz Paul. *Digital Imaging Processing*. Addison- Wesley 1987. p 2.
- 82 Op. cit. Baines. p 289.
- 83 Op. cit. Hoadley, en Neblette's Handbook, p 605. Ver ref. 201 a 207a en este manual.
- 84 Op. cit. Pounds. p 305.
- 85 Lucrecio. *De la naturaleza de las cosas*. Cátedra. 1994. p 103.
- 86 Para una exposición más en detalle de los principios de la microscopía y de la fotomicrografía hasta las primeras décadas del siglo XX, puede consultarse mi anterior trabajo op. cit. Fotografía y conocimiento. Cap. 3 y 6.
- 87 El método de la reacción negra, ideado por Camillo Golgi en 1873, también conocido como de coloración argéntica, es un método de tintado de los tejidos y células con uso de nitrato de plata, que se acerca al procedimiento fotográfico. Los tejidos son cortados en láminas muy finas mediante un microtomo, tras haber sido sometidos a diferentes compuestos químicos y ser bañados en una solución de nitrato de plata. Por razones aún desconocidas, las sales de plata se adhieren exclusivamente a las células nerviosas, resaltando su forma y sus diferentes partes (soma, dendritas y axones). Una vez fijadas y secadas las láminas, éstas pueden ser observadas con el microscopio y plasmadas en papel mediante el dibujo o la fotomicrografía. Esta técnica fue decisiva para el conocimiento de las redes neuronales y del comportamiento del sistema nervioso. En 1905, Golgi y Cajal fueron agraciados con el Nóbel por sus respectivos trabajos en estas áreas de la ciencia.
- 88 En este sentido se abre un marco de discusión muy interesante, de carácter epistemológico, documental, informativo y ético, suscitado por la función social y educativa que cumple la imagen manipulada y sintética de nuestros días, una vez que es presentada al público con valores propios y característicos de una imagen analógica. La divulgación científica y los medios informativos tienen mucho que decir al respecto, cuando no cesan de mostrar animaciones y fotografías manipuladas, relativas a mundos ocultos como el endoscópico, el astronómico o el submarino, como fiel reflejo de la realidad, sin especificar o subrayar el tratamiento recibido. La certificación de las imágenes, en cuanto al grado de analogía que presentan respecto de los objetos que la han hecho posible, trasciende hoy día el campo del derecho, donde existe una regulación ad hoc, para comenzar a ser demandada en ámbitos científicos, donde la autenticación de las mismas podría ahorrar malentendidos y algún que otro escándalo, motivado por los cada vez más numerosos casos de conducta fraudulenta entre los investigadores.
- 89 Binning, G; Fuschs, H; y Stoll, E. *Surface Diffusión of Oxygen Atoms Individually Observed by STM*. Surface Science Enero de 1986. p 295 y ss.
- 90 Op. cit. Eder. History of... p 385.
- 91 Rodman, G. H. Photomicrography. En Op. cit. Implement. p 317.
- 92 Rodman, G. H. Photomicrography. En Op. cit. Implement. p 317.
- 93 Para una diferenciación de los conceptos y técnicas relativos a la microfotografía, macrofotografía y fotomicrografía, consultar Op. cit Cuevas.



94 [www.olympus.com](http://www.olympus.com). En estas mismas páginas se puede obtener mayor información sobre técnicas de fotomicrografía que escapan a los límites cronológicos de esta investigación, como pueden ser las confocales, de núcleos replegados (deconvolution), microscopía confocal virtual, técnicas de computación de la función de transferencia de modulación (Modulation Transfer Modulation) relativa a la correlación entre resolución y contraste de las imágenes, sistemas de iluminación invertida, o tratamiento del color.

95 La apertura numérica (N.A) de un sistema óptico viene determinada por el índice de refracción del medio que separa el plano del objeto de la primera lente, multiplicado por el seno de la mitad del ángulo de aceptación.

96 Klosevych, S. *Principles and Practice of Microscopy and Scientific Photography*. Microscopical Society of Canada, 1989. p 18 y ss.

97 Blaker, A, A. *Handbook for Scientific Photography*. Focal Press, 1989. p 117 y 118.

98 En líneas generales el método Köhler consiste en enfocar el filamento de la lámpara (fuente de iluminación) en el diafragma de apertura que precede a la lente condensador, situada en las proximidades del portamuestra; y a un mismo tiempo, en enfocar el diafragma de la lente colectora en el plano del espécimen por medio del mismo condensador. Este alineamiento preciso posibilita la formación de un campo de luz muy acentuado y homogéneo en el plano donde se encuentra la muestra

99 Barnard, J. E. *Microscopy with Ultra- violet Light*. Nature, 18 de noviembre de 1920. p 378 y ss.

100 De aquí, que existan dos formas básicas de fotografiar en esta franja del espectro, bien mediante fotografía fluorescente, bien con fotografía de UV. En ambos casos, sólo la radiación de este tipo sirve para iluminar el objeto. Esto se logra mediante el emplazamiento de un filtro transmisor del UV en la fuente de iluminación, normalmente una lámpara de vapor de mercurio. De esta manera, mientras que en la fotografía de fluorescencia, se emplaza un filtro absorbente del UV delante de la cámara para permitir que sólo radiación visible llegue a la película, en la fotografía UV se emplea un filtro de acción opuesta, que trasmite exclusivamente radiación UV sobre la película. Aunque el material fotográfico en su conjunto es sensible a una amplia franja del UV, con el tiempo se fueron fabricando emulsiones especializadas en este tipo de fotografía, mediante la reducción al mínimo de la cantidad de gelatina presente en la amalgama, dado que es un material opaco a este tipo de radiación. La microscopía por fluorescencia permite la colocación de elementos y sustancias que gozan de esta propiedad en el interior de plantas y de los tejidos animales, y de tintes fluorocromáticos que pueden ser añadidos a distintas sustancias, como los ácidos nucleicos. Una variedad de este tipo de microscopia es la fotomicrografía por inmunofluorescencia, en la que se utiliza una molécula anticuerpo del sistema inmune para llevar un tinte de este tipo a un tejido o a una célula; luego, éste se ilumina con una determinada longitud de onda y se fotografía. (Ver Figura. 5.11.). El descubrimiento de estas técnicas coincidió en el tiempo con la salida al mercado en 1926 de las emulsiones de grano fino que permitieron ampliaciones de hasta 1000 aumentos.

101 Benford, J. R. *Ultra- violet Photomicrography and Metallography*. En Op. cit. Progress in.... p 233 y ss.

- 102 Röntgen W. C. *Sobre una nueva especie de rayos*. 1895. En Nicolle, J. Wilhelm Conrad Röntgen y la era de los rayos X. Ediciones Cid 1966. p 130.
- 103 P. Kirkpatrick. *An Approach to X-Ray Microscopy*. Nature. 12 de agosto de 1950. p 252.
- 104 Cosslett, V. E. *Microscopy with X-Rays*. Nature, 23 de mayo de 1959. p 1423 y ss.
- 105 Dunsmuir, R; Milner, C. J; y Spayne, A. J. *Pinhole Radiography of Magnetrons*. Nature. 14 de febrero de 1948. p 244 y 245.
- 106 Cosslett, V. E. y Nixon W. C. *X-Ray Shadow Microscope*. Nature. 7 de julio de 1951. p 24.
- 107 Tolansky, S. *Shadow Microscopy for Measurement of Height*. Nature. 28 de marzo de 1953. p 564 y ss.
- 108 Op. cit. Cosslett. p 1424.
- 109 Cosslett, V. E. y Nixon, W. C. *X-Ray Shadow Microscopy*. Nature. 13 de septiembre de 1952. p 436.
- 110 Ehrenberg, W, y Spear, W. E. *X-Ray Micro- radiography of Biological Specimens*. Nature. 22 de septiembre de 1951. p 513 y ss.
- 111 Op. cit. Benford. p 232 y 235.
- 112 Curtis, A. S. G. *Quantitative Photomicrography*. En Engel, C. E. *Photography for the Scientist*. Academic Press. 1968. p 485 y 488.
- 113 Op. cit. Blaker. p 120 y ss..
- 114 Op. cit. Klosevych. p 6.
- 115 Barer, R. *Phase- Contrast and Interference Microscopy*. En Op. cit. *Progress in* ... p 237 y ss..
- 116 Tolansky, S. *Surface Microphotography*. Longsman, 1960, p 4.
- 117 Op. cit. Blaker. p 124.
- 118 Bradbury, S. *Microscopy To-Day*. Nature. 19 de abril de 1958. p 1096.
- 119 Eddy, C. G. *Endoscopic Photography*. En Op cit. *Progress in*... p 270.
- 120 Op. cit. Shackel y Watson. p 556 y ss.
- 121 Montgomery, P, O'B; y Hundley, L. L. *Televisión Microscopy*. Nature. 16 de diciembre de 1961. p 1059.
- 122 Cosslett, V. E; y Duncumb, P. *Micro- analysis by a Flying- Spot X-ray Method*. Nature. 23 de junio de 1956. p 1172.
- 123 Barer, R. *Ultra- Violet Television Microscopy*. nature. 16 de diciembre de 1961. p 1060.
- 124 Op. cit. Curtis. p 498 y ss.
- 125 Buckles, R. G. *In vivo Bubble Detection by Acoustic- Optical Imaging Techniques*. Nature. 24 de mayo de 1969. p 771.
- 126 Kessler, L. W; Korpel, A; y Palermo, P. R. *Acoustic Microscope operating at 100 MHz*. Nature; 9 de julio de 1971. p 110 y ss.
- 127 Kessler, L. W; Korpel, A; y Palermo, P. R. *Simultaneous Acoustic and Optical Microscopy of Biological Specimens*. Nature. 8 de septiembre de 1972. p 111.
- 128 Op. cit. Hoadley, en Neblette's Handbook. p 592.
- 129 Aznárez, J. A; Catalina F. *Imagen latente superficial en haluros de plata. Óptica pura y aplicada*. Vol. 3. 1970. Num. 3. p 163 y ss. Aznárez, J. A. *Breakdown of Sodium Thiosulfate on Silver Halide Grains, Studied by Electron Microscopy*. Journal of Photographic Science Vol. 25, Nº 2, 1977, p 50 y ss.
- Aznárez, J. A. *Breakdown of Sodium Thiosulfate in Evaporated Silver Bromide*

*Layers, Studied by Electron Microscopy*. Photographic Science and Engineering. Vol. 25, November 6, 1981, p 219 y ss.

130 Webb, J. H. *Photographic Plates for the Use in Nuclear Physics*. Abridged Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 1182. p 321. Originalmente publicado en Physical Review. 74, 1948.

131 Op. cit. Webb. p 343-4.

132 Op. cit. Galison. p 146 y ss. En estas páginas se recoge una extensa biografía de esta científica.

133 Powell, C. F; y Rosenblum, S. *A New Method for the Determination of the Mass of Mesons*. Nature. 27 de marzo de 1948. p 474.

134 Op. cit. Webb. p 321.

135 Powell. C. F; y Fertel, G. E. F. *Energy of High- Velocity Neutrons by the Photographic Method*. Nature. 15 de julio de 1939. p 115-6.

136 En la cámara de burbujas, el trazo se forma por la adherencia de pequeñas burbujas, producidas por el proceso de ionización en el líquido emplazado en la cámara, y sometido a altas temperaturas

137 Op. cit. Catalá. p 25.

138 Rochester, G. D. *The Study of Sub- Atomic Phenomena by the Nuclear Emulsion*. Nature. 15 de octubre de 1960. p 175.

139 Autores como Catalá de Alemany prefieren conservar el término en inglés por no encontrar ningún vocablo en castellano que se adecúe a este fenómeno. El término difusión podría utilizarse sin problemas si no fuera por las connotaciones especiales que tiene en castellano y que podrían dar lugar a malinterpretaciones. Op. cit. p 25.

Catalá De Alemany, J. *La técnica fotográfica en física nuclear y radiación cósmica*. Anales de la Universidad de Valencia. Curso 1951- 52. Año XXV. p 25.

140 Fowler, P. H; y Perkins, D. H. *Application of the Photographic Plate to the Investigation of Problems in Nuclear Physics and Cosmic Rays*. En Fundamental Mechanism of Photographic Sensitivity. Butterwoths Sci. Publications. 1951. p 343.

141 Op. cit. Galison. p 149.

142 Op. cit. Catalá. p 7.

143 Spence, J. *The Action of Nuclear Particles on the Photographic Emulsions*. En Mees, C. E. Keneth. *The Theory of the Photographic Process*. MacMillan 1966. p 173.

144 Op. cit. Spence, p 175.

145 Occhialini, G. P. S; y Powell, C. F. *Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass*. Nature. 8 de febrero de 1947. p 188.

146 Ver Op. cit. Powell y Occhialini. *Nuclear Physics in...* p 110 y 111, donde se describe en detalle otro procedimiento parecido.

147 Op. cit Catalá. p 26.

148 Bates, W. J; y Occhialini, G. P. S. *Applications of the Reflecting Microscope to the Nuclear Plates Technique*. Nature. 27 de marzo de 1948.

149 Tschiderer, I. *The Photomicrography of Nuclear Tracks*. Abridged Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 1326. 1950. p 182 y ss.

150 Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. *Nuclear Physics in Photographs*. Clarendon Press, 1947. p 23.

151 Op. cit. Tschiderer. p 185.

- 152 Op. cit. Weinberg. p 152.
- 153 Occhialini, G. P. S; y Powell, C. F. *Observations on the Production of Mesons by Cosmic Radiation*. Nature. 31 de julio de 1948. p 168 y ss.
- 154 Op. cit. Powell y Occhialini. Nuclear Physics in... p 79.
- 155 Op. cit. Catalá. p XI.
- 156 Occhialini G. P. S; y Powell, C. F. *The Artificial Production of Mesons*. Nature. 10 de abril de 1948. p 551 y ss.
- 157 Berriman, R. W. *Electron Tracks in Photographic Emulsions*. Nature. 20 de marzo de 1948. p 432.
- 158 Op. cit. Powell y Occhialini. Nuclear Physics in... p 86.
- 159 Brown, R; Camerini, P; Fowler, P. H; Muirhead, H; Powell, C. F; y Ritson, D. M. *Observations with Electro- Sensitive Plates Exposed to Cosmic Radiation*. Partes I y II. Nature. 8 de enero de 1949. p 47 y ss. y 15 de enero. p 82 y ss.
- 160 Roblat, J. y Catalá J; y Gibson W. M. *Range- Energy Relation for Protons and Alpha- Particles in Photographic Emulsions for Nuclear Research*. Nature. 7 de abril de 1951. p 550 y ss.
- Fry, D. W. *High- Energy Particles and Machines for their Acceleration*. Nature. 7 de octubre de 1950. p 580.
- 161 Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum, S. *A Semi- Automatic Device for Analyzing Events in Nuclear Emulsions*. The Review of Scientific Instruments. Vol. 21. N. 12. Diciembre de 1950. p 978 y ss.
- 162 Op. cit. Webb. p 342.
- 163 Fueron numerosos los textos editoriales aparecidos en Nature en los años posteriores a la guerra, relacionados con temas como la seguridad, lealtad, libertad de pensamiento y de comunicación, secreto, etc. Muestras de ello, son: *Scientific Freedom and National Security*; de 26 de abril de 1952. p 677 y ss. *Release of Information on Atomic Energy*; y *Scientific Research in the Pacific Area*; del 22 de marzo de 1947. p 411 y ss.
- 164 Lalumia. J. *Ettore Majorana and Atomic Bomb*. Chapel Hill, 1993.
- 165 Hodges, A. *Alan Turing, the enigma*. Touchstone Ed. 1984.
- 166 Op. cit. Galison. p 194 y ss.
- 167 Rogers, A. W. *Techniques of Autoradiography*. Elsevier Publishing Company, 1969. p 1 y ss.
- 168 Previo a estas experiencias, el médico francés Boccage propuso en 1914 la idea de aplicar los rayos X a los cuerpos por secciones, siendo un precursor directo de las modernas técnicas de exploración por rayos X, léase la TAC (Tomografía Axial Computerizada), técnica desarrollada a principios de los setenta por A. M. Cormack y G. N. Hounsfield; por rayos gamma, léase la SPEC (Single Photon Emission Computed Tomography); o por positrones, o la PET (Positron Emission Tomography)
- 169 Broda, E; y Schönfeld. *The Technical Applications of Radioactivity*. Pergamos Press, 1966. p 47.
- 170 Herz, R. H. *Auto- Radiography*. En Op. cit. Progress in Photography. p 293 y ss.
- 171 Op. cit. Broda, p 48.
- 172 Liquier- Milward, J. Nature. 177 1956.
- 173 George, L. A.; y Vogt, G. S. *Electron Microscopy of Autoradiographed Radioactive Particles*. Nature. 7 de noviembre de 1959. p 1474.



- 174 O. Brien, R. T; y George, L. A. *Preparation of Autoradiograms for Electron Microscopy*. Nature 23 de mayor de 1959. p 1461.
- 175 Smith, J. R; Fozzard, H. A. *Localization of Tritiated "Digoxin" in the Myocardial Cells of Frogs and Dogs by Autoradiography Combined with Electron Microscopy*. Nature. 9 de febrero de 1963. p 562 y ss.
- 176 Chadderton, L. T; y Torrens, I. M. *Electron Microscope Observation of Nuclear Ractions*. Nature. 25 de julio de 1964. p 387 y ss.
- 177 Poole, J. H. J; y Bremmer, J. W. *Investigation of the Radioactivity of Rocks by the Photographic Method*. Nature. 5 de junio de 1948. p 884.
- 178 Ibid. p 885.
- 179 Poole, J. H. J; y Bremmer, J. W. *Investigations of the Distribution of the Radioactive Elements in Rocks by the Photographic Method*. Nature. 22 de enro de 1949. p 130 y ss.
- 180 Poole, J. H. J; y Bremmer, J. W. *Investigations of the Distribution of the Radioactive Elements in Rocks by the Photographic Method*. Nature. 22 de enro de 1949. p 130 y ss.
- 181 Los neutrones se pueden obtener al bombardear con rayos alfa, emitidos por el radio, contra determinados elementos como el berilio; o por medio de la fisión del uranio tal como sucede con las pilas atómicas. El choque de neutrones contra núcleos ligeros hace que su velocidad descienda hasta niveles comparables a la agitación térmica, razón por la que reciben el nombre de neutrones térmicos.
- 182 Young. D. A. *Etching of radiation Damage in Lithium Fluoride*. Nature. 9 de agosto de 1958. p 375 y ss.
- 183 Fleischer, R. L; Price, P. B; y Walker, R. M. *Nuclear Tracks in Solids*. Univ. of California Press. 1975. p xvii.
- 184 Mamuro, T; Fujita, T; Matsunami, T; Yoshikawa, K; y Azuma T. *Radioactive Air- Borne Dusts in Japan*. Nature. 19 de mayo de 1962. p 643 y ss.
- Mamuro, T; Fujita, T; Matsunami, T; Yoshikawa, K. *Microscopic Examination of Highly Radioactive Fall- Out Particles*. Nature. 10 de noviembre de 1962. p 529 y ss.
- 185 Op. cit. Fleischer. p 4.
- 186 Wood, J. A. *Chondrules and the Origin of the Terrestrial Planets*. Nature. 14 de abril de 1962. p 127 y ss.
- Pellas, P; Y otros. *Primitive Low - Energy Particle Irradiation of Meteoritic Crystals*. Nature. 19 de julio de 1969. p 272 y ss.
- 187 Jones, H; y Eagles, J. E. *Incorporation of Assimilated Carbon Into the Walls of Xylems Elements*. Nature. 18 de agosto de 1962. p 672 y ss.
- 188 Price, P. B; y Walker, R. M. *Observation of Fossil Particle Tracks in Natural Mica*. Nature. 24 de noviembre de 1962. p 732 y ss.
- 189 Op. cit. Fleischer. p 278.
190. Ibid. p 91 y 95.
- 191 Ibid. p 436.
- 192 Moon, P. B. *Developments in Gamma- Ray Optics*. Nature. 13 de febrero de 1960. p 427.
- 193 Anger, H. O. *Use of a Gamma- Ray Pinhole Camera for in vivo Studies*. Nature. 2 de agosto de 1952. p 200.
- 194 Aniansson G; y Steiger, N. *Microradiography with Alpha- Rays*. Nature. 2 de agosto de 1952. p 201.
- 195 Op. cit. Fleischer. p 583.

- 196 McLean S. *An Autorradiographic Effect*. Nature. 12 de agosto de 1961. p 690 y ss.
- 197 Ibid. p 691.
- 198 Mayneord, W. V; Turner, R. C; Newbery, S. P; y Hodt, H. J. *A Method of Making Visible the Distribution of Activity in a Source of Ionizing Radiation*. Nature. 3 de noviembre de 1951. p 762 y ss.
- 199 Bowden, F. P; y Chadderton, L. T. *Molecular Disarray in a Crystal Lattice Produced by a Fission Fragment*. Nature. 7 de octubre de 1961. p 31 y ss.
- 200 Chanteur, Jean; y Pellerin, P. *Localization by Autorradiography at - 195° C of Radioactive Areas in Rats Exposed to a High Flux of Thermal Neutrons: Importance of Phosphorus- 32 in Consecutive Internal Irradiation*. Nature. 6 de agosto de 1960. p 472 y ss.
- 201 Op. cit. Herz. p 294.
- 202 Op. cit. Fleischer. p 585.
- 203 Boyne, P. J; y Whittermore, W. L. *Neutron Radiography of Osseous Tumours*. Nature. 16 de abril de 1971. p 461.
- 204 Op. cit. West y Sherwood. p 159.
- 205 Op. cit. Steward y Koehler. p 39.
- 206 Op. cit. Fleischer. p 586.
- 207 Matthews, C. M. E. *Labelled Fluoroborate in the Stomach of Rats*. Nature. 27 de mayo de 1967. p 933.
- 208 Olby, R. *DNA before Watson-Crick*. Nature. 26 de abril de 1974. p 782.
- 209 Schrödinger. p 59.
- 210 Op. cit. Perutz, M. F. Obituary... p 74.
- 211 Bragg, W. *Crystals of the Living Body*. Nature. 1 y 8 de julio de 1933. p 11 y ss.
- 212 Waddington, C. H. *Some European Contributions to the Prehistory of Molecular Biology*. Nature. 25 de enero de 1969. p 318.
- 213 Darlington, C. D. *The Chromosome as a Physico- Chemical Entity*. Nature. 17 de diciembre de 1955. p 1139.
- 214 Op. cit. Waddington. p 319.
- 215 Bragg, L. *X-Ray Studies of Biological Molecules*. Nature. 10 de julio de 1954. p 55.
- 216 Pauling, L. *Molecular basis of biological specificity*. Nature. 26 de abril de 1974. p 769.
- 217 Ibid. p 770.
- 218 Astbury, W. T; y Bell, F. O. *X-Ray Study of Thyminucleic Acid*. Nature. 23 de abril de 1938. p 747.
- 219 Kendrew, J. C. *Structures of Proteins*. Nature. 9 de enero de 1954. p 57.
- 220 Schrödinger E. *¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva*. Tusquets. 1988. p 96. What is Life? The Physical Aspect of the living Cell. Cambridge Univ Press 1944.
- 221 Monod, J. *El azar y la necesidad. Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*. Barral Ed. 1971. p 24 y 31. Le hasard et la nécessité. Ed. du Seuil, 1970.
- 222 Ibid. p 70.
- 223 Maddox, B. Rosalind Franklin. *The Dark Lady of DNA*. HarperCollins Pub. 2002. p 87-8.
- 224 Ibid. 130

225 Ibid. p 156

226 Wilkins, M. H. F; Gosling, R. G; y Seeds, W. E. *Physical Studies of Nucleic Acid*. Nature. 12 de mayo de 1951. p 759.

227 Op. cit. Olby. p 784.

228 Ibid. p 153.

229 Op. cit. Maddox. p 161.

230 Op. cit. Maddox. p 177.

231 Crick, F. *The double helix: a personal view*. Nature. 26 de abril de 1974. p 766.

232 Chargaff, E. *Building the Tower of Babel*. Nature. 26 de abril de 1974. p 777 y 778.

233 Stent, G. S. *Molecular biology and metaphysics*. Nature. 26 de abril de 1974. p 779.

234 Franklin, R. E; y Gosling, R. G. *Evidence for 2-Chain Helix in Crystalline Structure of Sodium Deoxyrinonucleate*. 25 de julio de 1953. p 156 y ss.

235 Klug, A. *Rosalind Franklin and the Discovery of the Structure of ADN*. Nature. 24 de agosto de 1968. p 808.

236 Pauling, L; y Corey, R. B. *Compound Helical Configurations of Polypeptide Chains: Structure of Proteins of the  $\alpha$ - Keratin Type*. Nature. 10 de enero de 1953. p 59 y ss.

23 Op. cit. Pauling. Molecular basis... p 771.

23 Watson, J. D, y Crick, F. H. C. *Molecular Structure of Nucleic Acid*. Nature. 25 de abril de 1953. p 737 y 738.

23 Op. cit. Watson y Crick. Molecular... p 737.

240 Op. cit. Maddox. p 316.

241 Op. cit. Pauling. Molecular basis... p 771.

242 Op. cit. Klig. p 810.

243 Ibid. p 810.

244 Hamilton, L. D. *Models and Reality*. Nature. 18 de mayo de 1968. p 633 y 636.

245 Op. cit Monod. p 168-9.

246 Kendrew, J. C. *Architecture of a Protein Molecule*. Nature. 20 de septiembre de 1958. p 765.

247 Hanson, A. W. Taylor, C. A; y Lipson, H. *Fourier Synthesis by Optical Interference*. Nature. 28 de julio de 1951. p 160.

248 Op. cit. Maddox. p 184.

249 Hooper, C. W; Seeds, W. E; y Stokes, A. R. *Photographic Preparation of Masks of Large Molecules for the Lipson Diffractometer*. Nature. 16 de abril de 1955. p 679 y ss.

250 Op. cit. Kendrew. Architecture... p 766.

251 Perutz, M. F; y otros. *Structure of Haemoglobin. A Three-Dimensional Fourier Synthesis at 5.5-Å Resolution, Obtained by X-Ray Analysis*. Nature. 13 de febrero de 1960. p 416 y ss.

Kendrew, J. C; y otros. *Structure of Myoglobin. A Three-Dimensional Fourier Synthesis at 2 Å. Resolution*. Nature. 13 de febrero de 1960. p 422 y ss.

25 Op. cit. Bragg. X-Ray studies... p 55.

253 Ibid. 766

254 Op. cit. p 1144.

- 255 Kendrew, J. C; y otros. *A Three-Dimensional Model of the Myoglobin Molecule Obtained by X-Ray Analysis*. Nature. 8 de marzo de 1958. p 662.
- 256 Finch, J. T; y Klug, A. *Structure of Poliomyelitis Virus*. Nature. 20 de junio de 1959. p 1709 y ss.
- 257 Hodgkin, D; y otros. *Structure of Vitamin B12*. Nature. 20 de agosto de 1955. p 325 y ss.
- 258 Bernal, J. D. *A Geometrical Approach to the Structure of Liquids*. Nature. 17 de enero de 1959. p 141 y ss.
- 259 Lonsdale, K. *Neutron Diffraction by Crystals*. Nature. 6 de agosto de 1949. p 206.
- 260 Mach, E. *Conocimiento y error*. Espasa Calpe Argentina, 1948. p 132.
- 261 Un estudio más en detalle de la fotografía como herramienta de estudio de los objetos en movimiento durante el periodo de formación de la fotografía hasta 1927 puede consultarse en mi anterior trabajo Op. cit. Fotografía y conocimiento. Cap. 7. El estudio del movimiento.
- 262 McVeagh, J. S. *Multiple Spark Photography*. The Journal of Photographic Science, Vol. 18, 1970. p 23.
- 263 Op. cit. Eder, History. p 271.
- 264 Newhall, B. *The History of Photography*. MOMA, 1964. p 83 y 84.
- 265 Op. cit. Eder. La Photographie...
- 266 Op. cit. Mach. p 178-9.
- 267 Op. cit. Eder. La Photographie...p 39.
- 268 Op. cit. Beauty of another... p 189.
- 269 Op. cit. Eder. Le Photographie ... p 102.
- 270 Rosenblum, Naomi. *A World History of Photography*. Abbeville Press. 1984. p 133.
- 271 Op. cit. Eder. History of... p. 439.
- 272 Broadbente, T. E. *Path of the Trigatron Spark*. Nature. 20 de octubre de 1956. p 872-3.
- 273 Mason, J. H. *Electrophotography of Internal Discharges in Dielectrics*. Nature. 10 de septiembre de 1949. p 451.
- 274 Langevin, Paul. *Introducción a la relatividad*. 1947. Siglo XX. Bueno Aires. La Physique depuis vingt ans. p 8.
- 275 Op. cit. Eder. Le Photographie.. p 197-8.
- 276 Información en detalle sobre la obra de este investigador puede ser consultada en Op. cit. Cuevas. Cap. 7.
- 277 Früngel, F. B. A. *High Pulse Technology*. Academic Press. 1965. Vol II. p 11.
- 278 El fenómeno de estrías se forma mediante un procedimiento muy preciso y refinado. Se dirige un foco de luz a las proximidades del centro de un espejo cóncavo de manera que no se obstruya la vuelta de los rayos, al tiempo que se busca un punto de enfoque en el que el espejo se muestra iluminado en su totalidad. Una vez conseguido este efecto, se coloca una pantalla vertical que intercepta la imagen hasta hacerla desaparecer. Con el movimiento sutil de la pantalla podemos controlar el brillo de la imagen reflectada, obteniendo efectos distintos dependiendo del estado de la superficie del espejo. Si ésta no presenta irregularidades, el brillo se mantendrá por igual hasta el último momento; en caso contrario, la extinción no se producirá por igual, dando lugar a un efecto de contraste por sombras y luces en forma de estrías de gran relieve.



- 279 Op. cit. Eder. *La photographie...* p 116.
- 280 Sellin, R. H. J. *Existence of a Surface Tension Discontinuity at a Liquid Free Surface*. Nature. 10 de febrero de 1968. p 536 y ss.
- 281 Allen, H. M. *Detection of Inhomogeneities in Transparent Plastic Sheet by a Simple Schlieren Technique*. Nature. 6 de julio de 1957. p 50- 1.
- 282 Brown, D. R. *Swirling of a Liquid under the Influence of a Uniform Electric Field*. Nature. 30 de mayo de 1964. p 868 y ss.
- 283 Vandiver, J. K. *High speed colour schlieren photography*. Nature. 29 de noviembre de 1974. p 346.
- 284 Boys, C. V. *Drops and Splashes*. Nature, October 29,1908. p 666 y ss.
- 285 Op. cit. *Photography as scientific...* p 267.
- 286 Op. cit. Eder. *History of...* p 527,
- 287 Mitry, J. *Estética y psicología del cine*. Siglo XXI. Vol. II. p 29.
- 288Op. cit. Früngel. Vol. I. p v.
- 289 Op. cit. Hoadley. *Scientific Applications of ...* p 564.
- 290 Shaftan, K. *High Speed Photography*. En Op. cit. *Progress...* p 202. Esta última gozaba a mediados del siglo pasado de un límite superior de producción de fotogramas por segundo cercano al medio millón.
- 291 Op. cit. McVeagh. p 23.
- 292 Purves, P. E. *Locomotion in Whales*. Nature. 26 de enero de 1963. p 334 y ss.
- 293 Op. cit. Shaftan. p 203-4.
- 294 Ibid. p 205.
- 295 Op. cit Frungel. Vol I. p 272.
- 296 Ibid. p 281.
- 297 A. C. E. *Flame Movements in Gaseous Explosions*. Nature. 16 de abril de 1932. p 565-6.
- 298 Op. cit. Fraser. p 167.
- 299 Michaelis, A, R. *Cinematography in Scientific Research*. Nature. 15 de octubre de 1955. p 726.
- 300 Courtney- Pratt, J. S; y Thackeray, D. P. C. *High Speed Photography*. The Journal of Photographic Science, Vol. 5, 1957. p 38.
- 301 Doughty, G. *Photographic Instrumentation at Ordnance Proving Grounds*. The Journal of Photographic Science, Vol. 5. 1957. p 23.
- 302 Courtney- Pratt, J. S. *A Review of the Methods of High Speed Photography*. En Op. cit. London Physical Society. 20. 1957. p 411 y ss.
- 303 Op. cit. Shaftan. p 213.
- 304 Ibid. p 218- 220.
- 305 Fraser, R. P; y Dombrowski, N. *The Selection of a Photographic Technique for the Study of Movement*. The Journal of Photographic Science, Vol. 10, 1962. p 156.
- 306 Op. cit. Früngel. Vol II. p 5.
- 307 Andrade, E. N. da C. *Phenomena in a Sounding Tube*. Nature. 21 de marzo de 1931. p 438.
- 308 Stewart, C. P. Royal Aircraft Establishment, Bedford. Nature, 19 de octubre de 1957. p 775 y ss.
- 309 Beeson, E. J. G. *A High-Intensity Light Source for High Speed Cinematography*. Nature. 10 de septiembre de 1949. p 453-4.
- 310 Op. cit. Hoadley. p 574.

- 311 Op. cit. Shaftan. p 224.
- 312 Op. cit. Früngel. Vol. II. p 168 y ss.
- 313 Op. cit. Früngel. Vol. III. p 201 y ss.
- 314 Op. cit. Früngel.. Vol I, II (1965) y III (1976).
- 315 Porter, G; y Topp, M. R. *Nanosecond Flash Photolysis and the Absorption Spectra of Excited Singlet States*. Nature. 21 de diciembre de 1968. p 1228 y ss.
- 316 Op. cit. Früngel. p 194-5. Vol. II.
- 317 Vogel, S; y Feder, N. *Visualization of Low- speed Flow using Suspended Plastic Particles*. Nature. 8 de enero de 1966. p 186.
- 318 Op. cit. Shaftan. p 206.
- 319 Editorial. *The Armament Research and Development Establishment*. Nature. 6 de febrero de 1960. p 347.
- 320 Rowe, P. N; y otros. *Bubbles in Fluidized Beds*. Nature. 21 de julio de 1962. p 278-9.
- 321 Jacobs, J. E; y Kim, S. U. *A new penetrating-radiation image converter*. Nature. 25 de octubre de 1974. p 702-3.
- 322 Op. cit. Früngel. Vol I. p 309 y 319.
- 323 Lewis, J. B; y Partridge, B. A. *Fluidization*. Nature. 14 de octubre de 1967. p 124.
- 324 Op. cit. Früngel. Vol. III. p 253 y ss.
- 325 Peterson, A. W; y Kieffaber, L. M. *Infrared Photography of OH Airglow Structures*. Nature, 30 de marzo de 1973. p 321 y ss.
- 326 Editorial. *The National Physical Laboratory*. Nature. 17 de agosto de 1963. p 642.
- 327 Op. cit. Früngel. Vol. III. p 458-9.
- 328 Thorpe, S. A. *A Sediment Cloud Below the Mediterranean Flow*. Nature. 6 de octubre de 1972. p 326-7.
- 329 Field, G. S. *Vibrations in Solid Rods*. Nature. 23 de julio de 1932. p 130-1.
- 330 Lowarch, W. *Applications of the Schlieren Technique to the Study of Ripples*. Nature. 15 de septiembre de 1956. p 587-8.
- 331 Op. cit. Früngel. Vol. III. p 510 y ss.
- 332 Winning, C. H. *Enhanced Initiating Effect of Multiple Schock Intersections*. Nature. 7 de enero de 1956. p 32.
- 333 Op. cit. Früngel. Vol II. p 1.
- 334 Op. cit. Fraser. p 162.
- 335 Op. cit. Shaftan. p 209.
- 336 Op. cit. Früngel. Vol II. p 12 y 13.
- 337 Op. cit. Shaftan. p 210.
- 338 Op. cit. Fraser. p 164.
- 339 Op. cit. Früngel. Vol II. p 139.
- 340 Potter, J. M; y McDonald, D. A. *Cinematographic Recording of the Velocity of Arterial Blood- Flow*. Nature. 7 de octubre de 1950. p 596 y ss.
- 341 Huxley, A. F; y Niedergerke, R. *Structural Changes in Muscle During Contraction*. Nature. 22 de mayo de 1954. p 971-2.
- 342 Zawidzki, T. W; y Papér, H. M. *Pseudo- whiskers of Ice, grown from Clouds of Supercooled Water in an Electric Field*. Nature. 10 de noviembre de 1962. p 568-9.
- 343 Gage, J. *Photographic Method of Recording the Activity of Small Animals using Repetitive Electronic Flash*. Nature. 26 de febrero de 1966. p 933 y ss.

- 344 Rothschild, M; y otros. *Jump of the Oriental Rat Flea Xenopsylla cheopis (Roths)*. Nature. 1 de septiembre de 1972. p 45 y ss.
- 345 Williamson, R; y otros. *A fly's leap from paralysis*. Nature. 15 de noviembre de 1974. p 224 y ss.
- 346 Silverman, M; y Simon, M. *Flagellar rotation and the mechanism of bacterial motility*. Nature. 3 de mayo de 1974. p 73-4.
- 347 Grenall, A. *Direct Observation of Dislocation in Graphite*. Nature. 16 de agosto de 1958. p 448 y ss.
- 348 Sheppard, L. M. *Shock Wave from a Release of Gas at 110 km Altitude*. Nature. 2 de julio de 1966. p 59.
- 349 Mallory, W. R. *Reflectivity of Atmospheric Schock Waves*. Nature. 8 de enero de 1966. p 175 y ss.
- 350 Thonemann, P. C; y otros. *Production of High Temperatures and Nuclear Reactions in a Gas Discharge*. Nature. 25 de enero de 1958. p 217 y ss.
- 351 Allen, N. L; y otros. *A Stabilized High-Current Toroidal Discharge Producing High Temperatures*. Nature. 25 de enero de 1958. p 222 y ss.
- 352 Latham, R. *Thermonuclear Research in Great Britain*. Nature. 3 de octubre de 1959. p 1015 y ss.
- 353 Latham, R; y otros. *Growth of Surface Instabilities in a Linear Pinched Discharge*. Nature. 21 de mayo de 1960. p 624-5.
- 354 Allen, T. K; y Bickerton, R. J. *Experiments on the Compression of Plasma in Cusp Geometry*. Nature. 19 de agosto de 1961. p 794-5.
- 355 Wright, J. K; y otros. *A new "Wedge" Type Instability Observed in a "Theta" Pinch*. Nature. 9 de septiembre de 1961. p 1054.
- 356 Jones, L. A. *Rectangle Proportions in Pictorial Composition*. Abridge Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 410. 1930. p 101 y ss.
- 357 En fotografía fija pueden ser resueltas alrededor de 1000 pares líneas a lo largo y ancho de un fotograma; mientras que en cine, son 350.
- 358 Op. cit. Courtney- Pratt. A Review...p 380-1.
- 359 Courtney- Pratt, J. S. *High- Speed Photography*. Nature. 29 de diciembre de 1956. p 1441.
- 360 Holwill, M. E. J; Silvester, N. R; y Johnston, D. N. *High- Speed Cinematography of Microscopic Organism*. The Journal of Photographic Science. Vol. 27. 1979. p 214 y ss.
- 361 Latham, F. *A Man-Carrying Centrifuge*. Nature. 18 de junio de 1955. p 1057 y ss.
- 362 Medford, R. D; Powell, A. L. T; y Fletcher, W. H. W. *Existence of Weak R-Type Ionization Fronts*. Nature. 6 de octubre de 1962. p 32.
- 363 Quinn, R. G. *Laboratory Observations of Plasma Instabilities in a Dipole Magnetic Field*. Nature. 23 de octubre de 1965. p 376 y ss.
- 364 Roberts, J. B. G; y Turner, J. P. *Impact of Plasma on a Dipole Magnetic Field*. Nature. 19 de febrero de 1966. p 755 y ss.
- 365 Morton, B. R. *Model Experiments for Vortex Columns in the Atmosphere*. Nature. 2 de marzo de 1963. p 840.
- 366 Op. cit. The Armament... p 348.
- 367 Op. cit. Cuevas. Cap. 7.
- 368 Atkinson, D; Lewis, J. K. *Time-Lapse Cinematographic Studies of Fruit Tree Root Growth*. The Journal of Photographic Science. Vol. 27, 1979. p 253 y ss.

- 369 Audus, L. J. *Magnetotropism: a New Plan-Growth Response*. Nature. 16 de enero de 1960. p 132 y ss.
- 370 Green, B. C; y Spinks, J. W. T. *Lapse-Time Motion Picture Studies of Soil-burrowing Insects*. Nature. 8 de febrero de 1958. p 434.
- 371 Edwards, D. K. *A Photographic Method for recording Activity and Behaviour in a Group of Small Animals*. Nature. 28 de febrero de 1959. p 625.
- 372 Michaelis, A. R. *Scientific Cinematography in Great Britain*. Nature. 6 de octubre de 1956. p 728 y ss.
- 373 Engel, C. E; y Knox, R. *Serial Recording of Experiments*. Nature. 23 de febrero de 1957. p 411 y ss.
- 374 Hassett, N. J. *Discontinuities in Liquid Fluidized Beds*. nature. 14 de agosto de 1965. p 721.
- 375 Heard, B. E. *Photographs of Serial Sections of the Lung projected rapidly in Sequence using 16 mm. Film*. Nature. 14 de agosto de 1954. p 319 y ss.
- 376 Wilkinson, D. H. *Flight Recorders; a Technique for the Study of Bird Navigation*. Nature. 4 de febrero de 1950. p 188.
- 377 Op. cit. Michaelis. p 728.
- 378 Wells, J. W. *Coral Growth and Geochronometry*. Nature. 9 de marzo de 1963. p 948 y ss.
- 379 Correspondet. *History of Photography*. Glaciology. Nature. 25 de julio de 1970. p 333-4.
- 380 MacKay, D. M. *Moving Visual Images Produced by Regular Stationary Patterns*. Nature. 26 de octubre de 1957. p 849 y ss.
- 381 Lawson, R. W. *Blinking: Its Role in Physical Measurements*. Nature. 31 de enero de 1948. p 154 y ss.





## Capítulo 7. Consideraciones finales

*Composiciones estructurales, texturas celurares de las que suelen ocuparse la técnica y la medicina, presentan en un principio una afinidad mayor con la cámara que un paisaje sentimentalizado o un retrato lleno de espiritualidad.<sup>1</sup>*

Walter Benjamin

### 7.1. La imagen como herramienta científica

Tras este largo recorrido por la imagen en la ciencia, lo primero que llama la atención es la actitud de los científicos para con ella. En líneas generales es un elemento considerado, si no subsidiario, sí uno más en la amplia panoplia de instrumentos científicos a su alcance. En un primer momento, puede uno pensar que la investigación de un tema tan apasionante como el que aquí se trata, arrastra a uno a sobredimensionar el fenómeno en cuestión, y a sobrevalorar sus efectos. Pero tan pronto como se mira alrededor y se contempla el paisaje abigarrado y trepidante del mundo icónico que nos envuelve, único en la historia de la humanidad, las dudas comienzan a desvanecerse. Si además, se comienza a hojear las páginas de las revistas científicas más prestigiosas, comprobándose cómo nos llegan repletas de imágenes de toda índole y acompañadas de una publicidad que ofrece la tecnología más avanzada en cuanto a instrumentos de observación y sistemas de producción de imágenes se refiere, la certeza de que la imagen tiene mucho que ver con el conocimiento comienza a afianzarse. La creación del universo icónico que la humanidad ha construido a su alrededor desde la invención de la fotografía, ha sido probablemente motivo de inspiración de la idea expresada por Heidegger de que el hombre ha entrado en una fase de la historia, caracterizada por la conquista de una imagen de sí mismo. La época moderna, cartesiana, ha conseguido emplazar el hombre ante sí mismo como una representación, como una imagen. Si en la época griega el mundo es presencia, y realidad para el hombre; y en el medioevo es un ser creado, puesto en el universo bajos los ojos de Dios; los tiempos modernos presentan la singularidad de que el hombre se ve a sí mismo como parte de un escenario, como el protagonista absoluto del gran teatro del mundo. Esta introspección narcisista se alimenta, no por azar, de una realidad material repleta de fotografías, de películas, de carteles, de pantallas, o de fotocopias. La fotografía ha conmovido los pilares de la ciencia en la misma medida que los del arte, la comunicación, o la cultura. En el capítulo dedicado a la *fotografía y la revolución cuántica- relativista*, se comentó este *descuido* de los científicos, de ver la fotografía como un instrumento más, como un apéndice que se sitúa normalmente en los extremos de la cadena del método experimental; dedicado exclusivamente a registrar y mostrar los fenómenos observados. Da la impresión que el científico trabaja obsesionado en pulir las ideas inspiradoras de algún importante descubrimiento, pero ajeno a las herramientas que tiene entre sus manos.

Si las historias de la fotografía al uso pecan de olvidar la importancia que la fotografía tiene en el proceso de la adquisición de conocimiento, la ciencia hace un tanto de lo mismo al no otorgarle el puesto que se merece dentro de este mismo proceso. Si hay una primera conclusión, tras este extenso recorrido por más de dos

siglos de la historia de la fotografía y el conocimiento, es que la imagen tecnológica en general, se ha convertido en una pieza fundamental del discurrir y sentir humanos. Desde ahora, estamos obligados a contemplar la historia de la ciencia desde la observación, y no exclusivamente desde el concepto o las ideas, como ha sido lo habitual durante tantos años. El avance de la ciencia se sustenta en la imagen, tanto o más, que en el pensamiento o en lo mensurable. De hecho, este nuevo elemento afecta al resto de las actividades humanas sin excepción, incluido el propio razonamiento, la fantasía, la memoria o los sueños. La imagen se ha convertido hoy día en un valor de cambio, en un reflejo de lo que somos, y en ese escudo de Atenea— que nos recuerda Kracauer<sup>2</sup>—, a través del cual osamos mirar de frente la realidad que nos envuelve, incluido nosotros mismos. La ciencia no ha escapado a esta influencia, en principio, porque es parte responsable de su creación y crecimiento; y a la postre, porque afecta de lleno al método experimental, herramienta maestra con la que el científico esculpe sus ideas y sus obras.

## 7.2. La imagen, entre el idealismo y el materialismo

*El avance de la ciencia no se debe al hecho de que se acumulen más y más experiencias perceptivas con el correr del tiempo, ni al de que haríamos cada vez mejor uso de nuestros sentidos. No es posible destilar ciencia de experiencias sensoriales sin interpretar, por muy industriosamente que las acumulemos y escojamos; el único medio que tenemos de interpretar la Naturaleza son las ideas audaces, las anticipaciones injustificadas y el pensamiento especulativo: son nuestro solo organon, nuestro único instrumento para captarla.<sup>4</sup>*

Karl Popper

Desde tiempos remotos los pensadores se han debatido entre dos tendencias muy marcadas a la hora de determinar el origen del conocimiento humano. Los idealistas otorgan prioridad al mundo de las ideas, de las especulaciones y de las “*anticipaciones injustificadas*”; a esa apuesta premonitoria que siempre acompaña toda teoría. El fin último de esta postura siempre remite a la idea de que existe en la naturaleza una serie de principios formales, de carácter geométrico o matemático que son descubiertos con el poder inmanente de nuestro pensamiento. Al fin y al cabo, según ellos, pensamiento y ser se deben a esos mismos principios. El conocimiento, por tanto, tendrá siempre por esta vía un carácter provisional, incumplidor del ideal científico de la *episteme* (ἐπιστήμη), o conocimiento seguro y demostrable. Las *reminiscencias* de Platón son un ejemplo de ello. El conocimiento, según este filósofo, nos pertenece, se encuentra en nosotros mismos, se trata tan sólo de ir despertándolo con nuestros sentidos y de avivar su recuerdo. La ciencia no sería más que una evocación de reminiscencias<sup>5</sup>. Esta teoría del conocimiento está en consonancia con la idea de lo Uno, de lo Absoluto, de Dios, del conocimiento *a priori* y de la esencia de las cosas, perla inaccesible a los sentidos.

En el camino contrario, encontramos las escuelas que defienden los sentidos y la experimentación como primera causa del conocer. En esta ocasión, la naturaleza se sitúa por encima de todo; bien por comprenderse que el mundo

existe independientemente de nosotros y de nuestra razón, bien por defender que ella nos ofrece la verdadera medida de las cosas. Los científicos modernos no han podido rehuir esta disyuntiva. La semilla de la polémica está sembrada desde que Kepler y Galileo vieron la necesidad de consolidar el método experimental en ciencia con un formulismo matemático riguroso, o desde que Descartes antepuso la razón a la experiencia.

La fotografía tampoco ha podido eludir esta división. Su poder le viene dado fundamentalmente por la fijación de las luces y las sombras de lo natural en toda suerte de soportes. Opera, por consiguiente, como una extensión de nuestros sentidos. La facultad de observación es realzada por ella, potenciada hasta niveles desconocidos. Y esta capacidad se ve impulsada aún más por su unión con el resto de instrumentos ópticos. El telescopio, el microscopio y el espectroscopio, a través de la fotografía, han conseguido abrir enormemente las posibilidades de lo científico una vez que los universos lejanos, diminutos e invisibles en la naturaleza han podido ser representados. No digamos cuando la imagen tecnológica se asocia a las cámaras de expansión, a los aceleradores y detectores de partículas, a los rayos X, o a cualquier dispositivo capaz de traducir las señales de luz o eléctricas en una imagen reconocible, las vías hacia el conocimiento se abren entonces hasta límites insospechados.

Pero ¿quiénes son los responsables de esta hazaña, son los nuevos ojos tecnológicos de la ciencia, o la razón y el espíritu que los crea y construye, dictándoles lo que deben mirar? La idea y la praxis vuelven a enfrentarse de nuevo para hacernos vacilar sobre la autoría de este prodigio. El físico Heisenberg comenta que fue Einstein quien le aseguró durante un paseo juntos, que la teoría dicta siempre lo que se debe observar. El idealismo actual diría que las cámaras nacen de las teorías de la Óptica, que las emulsiones lo hacen a partir de las leyes de la química, que los sensores de carga acoplada parten del cuerpo teórico acumulado por la física del estado sólido. Sus adversarios responden que la cámara oscura nace de los círculos de sombra formados por la luz de los eclipses al pasar a través de las ramas de los árboles, tal como observó Aristóteles; que fueron las marcas producidas por el sol sobre los frascos de sales de plata que Schulze dejó en el alfeizar de una ventana los que condujeron al estudio de los procesos fotoquímicos en las sales de plata y a la fijación de sus primeras leyes; o que fue el ligero temblor del electroscopio de Hertz el que dio a conocer el desprendimiento de los electrones producido en un metal por la acción de la luz, abriendo las puertas a la ciencia fotoeléctrica. Habría que llamar la atención de ambos bandos sobre los numerosos descubrimientos acaecidos por accidente, fruto de una observación fortuita e impredecible.

El método experimental se alimenta de observaciones y mediciones debidamente interpretadas, de praxis y teoría que se resisten a ir separadas. Hasta ahí, existe un acuerdo unánime en el seno de la ciencia moderna, tan marcada por las lecciones de Auswitsch e Hiroshima. Todo está en decidir el sentido ontológico que adopta este proceso. Si existe, a mi parecer, una conclusión al respecto, es que la imagen marca junto con la medición de los fenómenos el inicio de toda teoría, y que tanto una como otra se deben a los hechos. Las imágenes son fuente de inspiración y de confirmación de las hipótesis. No sería aventurado afirmar, por consiguiente, que sin fotografía; o mejor aún, sin imagen técnica, las grandes interpretaciones de lo natural del pasado siglo -léase la relatividad, la mecánica cuántica, la teoría dual de la luz y la materia, o los nuevos principios sobre la herencia-, no hubieran disfrutado de tanto alcance.



### 7.3. De lo concreto a lo abstracto

Los resultados de las mediciones y de las observaciones científicas pueden ser materializados tanto en imágenes analógicas<sup>6</sup>, como en forma de figuras, gráficos, diagramas, mapas, modelos o imágenes sintéticas. Desde la geometría de Euclides, o desde el eje de coordenadas de Descartes, los científicos cuentan con esta doble posibilidad que se extiende desde lo concreto de un reflejo o una sombra, a lo abstracto de un histograma o una representación geométrica. En el primero caso, es nuestra mirada y nuestro raciocinio el que debe acomodarse a la nueva realidad descubierta; en el segundo, son los objetos los que se adaptan a nuestra forma de razonar e interpretar el mundo. La imagen de lo desconocido, o de lo conocido que se retoma con ojos nuevos, es tal vez, junto con lo mensurable, el elemento fundamental para avanzar en el camino de la ciencia. Sería un peligro descuidar este doble aspecto inherente a la observación de la realidad, perder de vista que la representación de los fenómenos naturales recorre un camino de menor a mayor abstracción, y de menor a mayor *contaminación* humana, que va desde la imagen analógica al diagrama, o desde el apunte y el dibujo a la construcción de modelos.

La matematización constante que ha sufrido la ciencia desde Kepler y Galileo ha avivado esta disyuntiva, llegándose hoy día a un punto culminante con la aparición de los autómatas lógicos. Los ordenadores han potenciado entre la amplia gama existente de instrumentos de visualización, los de funcionamiento electrónico. La afinidad que existe entre una tecnología y otra, y el hecho de que los procesos de formación de imágenes electrónicas obedezcan a fenómenos altamente controlables y conocidos, han beneficiado esta opción. Mientras que el proceso interno de formación de imágenes mediante el procedimiento fotográfico de sales de plata sigue sin ser comprendido en su totalidad, la ciencia goza de un conocimiento muy completo del proceso de formación de la imagen electrónica; entre otras razones porque ha llegado a dominar y comprender los procesos electrónicos que acontecen en el conjunto de la materia. La *pixelización* de la imagen es el máximo exponente de esta conquista, como resultado de un esfuerzo que ha permitido definir y aislar la unidad mínima de operación icónica. Una nueva fase en la producción de imagen artificial ha quedado abierta, caracterizada por una mayor eficiencia y control de todo el proceso de formación de la imagen, y por el alto nivel de manipulación sobre los resultados. Esta dinámica desemboca irremediabilmente en un binomio dominado por los conceptos de imagen y lógica en los procesos de adquisición de conocimiento científico. La formación de la imagen digital obedece tanto a fenómenos fotoeléctricos como a procesos lógico-matemáticos. Esto revalida nuevamente el peligro de adjudicar al pensamiento una prevalencia sobre los objetos, tal como puede ocurrir en el campo de la producción de imagen sintética a partir de algoritmos aplicados a la imagen óptica e *incompleta* de los fenómenos; o en los trabajos de simulación a partir de variables y datos mensurables. Toda imagen supone un apartamiento, sustitución o mediación de la realidad. La utilidad de cada una de sus formas no representa el eje de las discusiones, sino el olvido de la propia realidad como fuente original de esas imágenes y del propio conocimiento.

### 7.4. La imagen oculta

La imagen se expande en todas direcciones. Es huella, sombra y símbolo a un mismo tiempo. En ciencia desvela la estructura y los procesos dinámicos de los objetos naturales por analogía, presentando y re-presentando los hechos registrados experimentalmente. El afán de lo científico es *ver para comprender*.

Cuando existe una visibilidad escasa entra en juego la imaginación, la imagen simulada o el artificio. Si la imagen obedece a la interrelación de la luz o de una radiación con una materia que muestra su acción en el tiempo, los soportes donde aparece reflejada y registrada pueden ser infinitos: plasma, pantallas de fósforo, de cristal líquido, emulsiones, una sábana blanca, la piel, o una roca horadada por un isótopo radiactivo. Más allá de esta huella nos encontramos con la acción del hombre, forzando el curso de los acontecimientos, intentado que la naturaleza muestre sus verdades íntimas a golpes de fantasía e imaginación, de dibujos y bocetos indagadores, de reconstrucción de fases de ondas luminosas con utensilios matemáticos, de simulaciones generadas por algoritmos. Existe un límite impreciso entre la imagen huella y la imagen imaginada, entre la imagen que denota un significado preciso y la que connota algo enigmático, provocador de un sentimiento indescifrable. Recordemos aquí las palabras introductorias de Maxwell, en la antesala de esta obra. La ciencia busca infatigablemente nuevas imágenes, y cuando las encuentra, busca dentro de ellas nuevas pistas, nuevos secretos escondidos entre sus trazos y figuras. La imagen huella, a diferencia de la mental, la imaginada o simulada, es una prolongación o extensión de la realidad, guardando en sí tantos secretos como el objeto natural que le da vida. Tras su apariencia puede esconderse, como señaló en su día M. Antonioni, nuevas imágenes latentes, mensajes ocultos, hasta el momento inobservados e indescifrables. Cuando una espectrografía nos muestra el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales, de donde se infiere el progresivo alejamiento de los cuerpos celestes respecto del observador; o cuando el patrón geométrico formado por un rayo X difractado al atravesar un cristal de ADN nos muestra la estructura helicoidal de la secuencia de pares de nucleótidos que conforman el proceso altamente mecanizado de la replicación celular, comprendemos lo necesario que son estas dos etapas de creación e interpretación de las imágenes para el avance científico. La imagen emergente es siempre un nuevo punto de partida para el científico. El sentido epistemológico de la teoría y la praxis científicas descansa sobre las relaciones recíprocas que se establecen entre estas imágenes, externas e internas, y los objetos reales de donde parten.

## 7.5. ¿Es posible una ciencia de la imagen técnica?

*La ciencia comienza allí donde el significado de las palabras está estrictamente delimitado.<sup>7</sup>*

Leon Brillouin

La creación del universo icónico a partir de la llegada de la fotografía ha obligado en repetidas ocasiones a sistematizar los distintos valores y utilidades que la imagen tecnológica dispone y ha ido adquiriendo con el tiempo. De un papel meramente testimonial e ilustrativo de los fenómenos observados, la imagen ha pasado a ser una herramienta en sí para la adquisición de conocimiento, signo y símbolo de una nueva expresión, y materia básica para los procesos de información, comunicación y documentación. Todo está pues en decidir si la imagen técnica como tal, ha llegado a conformar una entidad propia dentro de las herramientas científicas, de la comunicación y de la expresión artística. ¿Podemos llegar a establecer sus unidades mínimas operativas, descomponiendo el todo en sus partes? ¿Se puede estructurar un lenguaje formalizado a partir de sus productos, significados y utilidades? ¿Es posible descomponer su discurso en base a sus signos físicos y materiales, y a su función simbólica? Los teóricos del cine, ante los niveles tan sofisticados de expresión que la imagen fílmica ha conseguido con la simple sucesión de fotogramas, han debatido extensamente

sobre estas cuestiones. ¿Ocurre lo mismo con la fotografía fija o con las múltiples formas que adoptan los signos y símbolos iconográficos? ¿Podríamos defender, llevados por las palabras introductorias de Brillouin, que la ciencia de la imagen comenzará cuando el significado de los elementos mínimos de las imágenes esté perfectamente descifrado? La semiología ha sido la disciplina a la que más se ha recurrido en este empeño a lo largo de las últimas décadas. Hasta el momento, la complejidad del fenómeno ha impedido una postura común y de consenso. La diferenciación que se establece entre las imágenes, una vez que atendemos a sus valores denotativos y connotativos, ha sido crucial en estas cuestiones. En este sentido, el trayecto histórico que hemos recorrido en estas páginas puede proporcionar pistas esclarecedoras; o, al menos, elementos de análisis que nos ayuden a profundizar en la identidad y el valor de las imágenes tecnológicas.

Numerosas ciencias deben su estado de desarrollo al haber encontrado las partes mínimas de las que están compuestos los fenómenos que estudian. Esta conquista normalmente comienza con una fase taxonómica, orientada a despejar ambigüedades y a sistematizar y ordenar en lo posible la complejidad a la que están sometidos los hechos. Las ciencias naturales dedicadas a los seres inanimados, como es el caso de la física, tienen a su favor enfrentarse a fenómenos relativamente estables, simples y reversibles. Ahí radica gran parte de su éxito. En cambio, las ciencias humanas, incluidas las de la información y de la imagen, se enfrentan a realidades complejas y sistemas abiertos de difícil abordaje. La gran cantidad de variables a tener en cuenta, el dinamismo acentuado y la irreversibilidad de sus fenómenos, obligan a desplegar herramientas multidisciplinarias. En el caso de la imagen tecnológica se han propuesto distintos sistemas taxonómicos a lo largo de la historia en aras de sistematizar el universo tan complejo que la conforma. Desde que F. J. Arago presentó en julio de 1839 un informe detallado sobre la nueva invención de Niepce y Daguerre ante la Cámara de Diputados del Parlamento francés, como complemento a la bienvenida oficial dada en enero de ese mismo año ante la Academia de las Ciencias Francesas, ya se pudieron vaticinar las aplicaciones científicas de la fotografía del futuro<sup>8</sup>. Así, Arago mencionó en su discurso las grandes ventajas que el nuevo medio traería a la técnica fotométrica y a ramas de la ciencia tan importantes como la astronomía, la microscopía, la fisiología, la medicina y la topografía. Tan sólo se quedó en el tintero la espectrografía y la fotografía del movimiento fugaz de los objetos, dos ramas fundamentales para el avance de la ciencia. Pero como vemos, no se apartó demasiado de lo que iba a ocurrir realmente con el paso de los años. Posteriormente, surgieron propuestas de sistematización del universo fotográfico atendiendo tanto a sus aplicaciones científicas como artísticas, donde cabe destacar las de Moholy-Nagy y Otto Steinert, ambas tratadas en estas páginas. (ver Cap. 5.2. Introducción). Desde el lado de la investigación científica, y más concretamente en el sector de la industria fotográfica, sobresalen los organigramas sugeridos por Kenneth Mees en el año 1918 (ver Figura 5.2), óptimos para comprender los elementos integrantes que hacían posible entonces la fotografía de sales de plata. Por último, recordar el esquema de elaboración propia (ver Figura 5.3) que resume el estado actual de esta industria, personalizado en la firma Kodak, en 2003. Es evidente, tal como se desprende de este cuadro, que la entrada en escena de los sensores de estado sólido y de los procesos informáticos y de la comunicación a distancia han transformado sustancialmente el universo icónico.

En la década de los sesenta del siglo pasado, los intentos más destacables por sistematizar el conocimiento acerca de las nuevas realidades traídas por el cine y la fotografía en el ámbito de la comunicación vinieron principalmente de la semiología. Un ejemplo de ello es el modelo de las tres articulaciones del lenguaje fílmico, propuesto por Umberto Eco<sup>9</sup>. La distinción que hace este autor entre los niveles del significante, del significado y del sintagma, como base de esta tres

articulaciones, se presta con facilidad a ser utilizada como herramienta de análisis de la imagen al servicio de la ciencia. A pesar del peligro que se corre al intentar sistematizar la complejidad abigarrada y tentacular del lenguaje filmico, dado la inexistencia de una *especificidad cinematográfica*<sup>10</sup>, el esquema propuesto por Eco tiene el mérito de integrar aportaciones hechas con anterioridad por otros autores, y de ofrecer una visión de conjunto.

Recordemos que la irrupción de la lógica moderna en el siglo XIX, unido al empeño de cientifizar todas las disciplinas posibles, incluida el lenguaje, hizo que los científicos, inspirados y conducidos por el positivismo en su mayor parte, buscaran la matematización de sus respectivas materias de estudio. El padre de la lingüística moderna, Saussure, buscó con ahínco este camino con el anhelo de que se pudiera construir un álgebra que relacionara por medio de ecuaciones la mecánica y la acústica de los sonidos en el habla<sup>11</sup>. Las secuencias fotográficas de los sujetos parlantes a la hora de pronunciar determinados fonemas, o el registro en papel fotográfico de las ondas sonoras provocadas por esas mismas emisiones (ver Figuras 2. 67; 2.68; y 2.69) que duda cabe que incidieron en estas manifestaciones y en los intentos por proporcionar unas bases científicas al lenguaje humano. Si George Boole ideó un álgebra simplificada como modelo del razonamiento humano más básico, porqué no intentar lo mismo con el propio vehículo por el que circulan los pensamientos.

La separación artificial de la cadena continua de sonidos emitida por el aparato vocal dio lugar a la estipulación de los fonemas, unidades mínimas de sonido comprendidas en el tiempo. Incluso se pretendió aislar unidades aún menores de las que estarían compuestos los fonemas, como la t en ta, lo que obligaría a separar los elementos físicos en la cadena temporal con un grado mayor de precisión.

*Si se pudieran reproducir por medio del cinematógrafo todos los movimientos de la boca y de la laringe que ejecutan una cadena de sonidos, sería imposible descubrir divisiones en esa secuencia de movimientos articulatorios: no se sabe dónde comienza un sonido y dónde acaba otro.*<sup>12</sup>

*... los signos de la lengua son, por decirlo así, tangibles; la escritura puede fijarlos en imágenes convencionales, mientras que sería imposible fotografiar en todos sus detalles los actos del habla; la fonación de una palabra, por pequeña que sea, representa una infinidad de movimientos musculares extremadamente difíciles de conocer y de imaginar. En la lengua, por el contrario, no hay más que la imagen acústica, y ésta se puede traducir en una imagen visual constante.*<sup>13</sup>

Si el análisis y descomposición de la cadena acústica del habla sirvió con creces para fijar una ciencia del lenguaje, en el caso de la imagen tecnológica los esfuerzos encaminados a delimitar su estructura, a presentar una semiología que comprendiera el funcionamiento de sus signos, o a aportar unas bases científicas de la comunicación visual han chocado una y otra vez con problemas irresolubles. Los signos del cinematógrafo, como señaló en su día Pasolini, son los mismos hechos de la realidad, que dan lugar a los *cinemas*, unidades mínimas del lenguaje



fílmico. El *cinema* presenta a su vez una doble articulación, una relativa al objeto filmado (segunda articulación), y otra determinada por el plano o el encuadre (primera articulación), a semejanza del lenguaje humano donde encontramos los fonemas y los monemas<sup>14</sup>. Hay que reconocer que el nivel del sintagma en el código iconográfico complica notablemente las cosas; pero sería impensable desligar por completo la imagen fija de la secuencial en el análisis de la imagen tecnológica en su conjunto. La ciencia se ahorra en este sentido muchos esfuerzos al desestimar, de momento, en sus estudios la ilusión del movimiento, o el discurso narrativo que producen los fotogramas, tal como hemos comprobado en el capítulo dedicado a la imagen del movimiento.

El problema radica en cómo descomponer la realidad fotografiada en unidades mínimas identificables. Nos pasaría como a Saussure intentando descubrir esas divisiones en la secuencia de los movimientos articulatorios. Volviendo al modelo de las tres articulaciones de Umberto Eco, tendríamos que las unidades físicas mínimas de las que se compone la imagen técnica son las luces y las sombras, los colores y los espectros que emanan de los objetos reales. De estos elementos físicos en el plano del objeto y de la imagen pasaríamos al nivel de las figuras, como signos que comienzan a proporcionarnos algunas pistas hacia lo reconocible: formas geométricas, efectos de figura- fondo, los grados de densidad u opacidad fotográficos, el contraste. El siguiente escalón vendría dado por los signos propiamente dichos, figuras reconocibles pero en una dimensión abstracta, como el *arbol* que representa a todos los árboles en los códigos de comunicación más simplificados. Y así, hasta culminar en los semas: los signos iconográficos con valor icónico, las imágenes de lo real en sí. En ciencia, lo prioritario es el primer nivel de los elementos físicos del objeto y de la imagen. El plano o el encuadre como tal puede ser muy diverso, al no estar sujeto a ninguna forma establecida ni a ninguna dimensión en particular. El trazo producido por las radiaciones en los distintos sensores interesa como tal, pudiendo ser multiforme y pluridimensional. El valor simbólico de la imagen en ciencia es deshechado por el de la interpretación en un marco teórico de referencia. Y esto nos conduce al siguiente nivel: el del significado.

En el nivel del significado, el valor de la imagen técnica en general se despliega en un continuo que iría desde el enigma y el secreto de figuras y trazos indescifrables ( lo incomprendido en ciencia, la desinformación mediática, los mensajes encriptados o los sueños), a aquello que nos proporciona conocimiento, como es el caso de la imagen científica interpretada, o a aquellas otras que son vehículo de expresión y comunicación, y cuyos efectos son de deleite, estimulación, redención, o de enajenación y letargo. Las imágenes artísticas, pornográficas, religiosas, psicodélicas y redentoras, como los *mandalas*, serían ejemplos de esto último. La denotación y connotación de las imágenes marca en este contexto una línea divisoria entre los niveles de la expresión y el conocimiento. Pretendidamente, la imagen científica procura atenerse al valor denotativo, tal como inspiran los propios objetos de la naturaleza de los que son reflejo; la ausencia de capacidad simbólica la aparta de un significado social, de ser un *fragmento de ideología*<sup>15</sup>, a diferencia de lo que ocurre con las imágenes expresivas y narrativas. Sería la interpretación que se hace de ellas y la estructuración de este contenido dentro de un cuerpo hipotético de principios científicos - tal como se haría con un fenómeno o hecho natural- lo que le otorga un valor connotativo; pero no ausente de ideología, como cualquier producto del intelecto humano. El marxismo nos diría que la ciencia no deja de ser, en este sentido, un fruto más de las relaciones de producción del momento histórico en el que se produce. El modelo de ciencia imperante en cada época persigue la conquista del conocimiento dentro de las limitaciones propias que le infiere la estructura social y económica en la que se desenvuelve.

En la actualidad estas disquisiciones se han visto notablemente afectadas por la llegada de la tecnología digital de la imagen. Los niveles del código iconográfico se encuentran ahora mediatizados por la presencia del píxel como una unidad mínima configuradora de la imagen. La representación de los objetos naturales ha dejado de depender de un sistema fotoquímico, como es el fotográfico de sales de plata, incomprendido en su totalidad desde la ciencia, por uno nuevo en el que las propiedades de los fenómenos observados quedan definidas por esta unidad indivisible que opera en función de las radiaciones captadas y de la capacidad de procesamiento de la información interna del sistema. La observación comienza un proceso de matematización progresivo, en consonancia con el espíritu traído por Galileo a las ciencias naturales,

*No la observación produjo la física, sino la exigencia de la observación exacta. Y exactitud es un vocablo que sólo tiene sentido propio, auténtico, en matemática. Lo nuevo de la nuova scienza de Galileo fue la introducción formal de la matemática en la observación, la cuantificación radical de los fenómenos por su radical mensurabilidad; por tanto, la experiencia matemática.*<sup>16</sup>

Los procesos lógico- matemáticos aportarán una nueva dimensión al fenómeno de la imagen técnica y ayudarán sin duda a la construcción de un lenguaje y una ciencia en torno a ella. El valor semántico e interpretativo que origine la agrupación de unidades de este tipo seguirá, no obstante, siendo un asunto complejo que deberá ser abordado de forma interdisciplinar por el conjunto de las artes y de las ciencias.

## 7.6. Imagen, imaginación y materia

*La fantasía abandonada de la razón, produce monstruos imposibles: unida a ella, es madre de las artes y origen de sus maravillas.*<sup>25</sup>

Francisco de Goya.

De forma inevitable, cuando dejamos de ver un objeto, entra en acción el mundo de la representación, vuelve a *re- presentarse* en la mente fuera del espacio y del tiempo en los que fue observado. Esa es una de las grandes capacidades del ser humano, prodigio de su memoria y de su fantasía. Lo mismo ocurre cuando una imagen real, análoga o no al objeto, desaparece de nuestra visión; el recuerdo la aviva, ya distinta para siempre, o se desvanece en el olvido. La memoria es un mundo poblado de imágenes cuya evocación o censura (psicológica) obedecen a procesos complejos en los que intervienen factores biológicos, psicológicos y culturales. Para la ciencia, allá donde termina la presencia del objeto o de la imagen tecnológica, comienza la imagen mental. A lo largo de la historia de la ciencia, encontramos en repetidas ocasiones el papel fundamental que tanto un tipo de imagen como otra ha desempeñado en el avance científico. Raro es encontrar en los dos últimos siglos una teoría, hipótesis o experimento que no esté respaldado por un acto de imaginación o de imagen. Partículas, astros, genes y moléculas han quedado retratados para siempre tan fidedignamente como lo han sido paisajes, bodegones, personalidades y obreros. Recordemos también que en la literatura científica anglosajona y germánica, el concepto de *imagen física* equivale al de hipótesis, al de teoría, o al de modelo imaginario que integra las

partes y las leyes de un sistema físico. Sería algo así como la representación visual y conceptual, compacta y única, de un entramado de hechos, principios y observaciones hasta entonces desunido y sin relacionar convenientemente.

Y no es fortuito que esta representación sea una mezcla de imágenes y de conceptos. El pensamiento obra de ese modo, en un constante flujo de estímulos visuales, en ocasiones vagos e imprecisos, en otras vivos y reales, entrelazados con ideas unidas a palabras o a sensaciones. La actividad mental de las personas se debate bajo el influjo de la acción, de las representaciones y del lenguaje. “¿No es la imagen puro pensamiento?” preguntaba Sartre<sup>26</sup>. O recordemos a Aristóteles reivindicar un papel de primer orden para las imágenes mentales.

*En vez de sensaciones, el alma discursiva utiliza imágenes. Y cuando afirma o niega (de lo imaginado) que es bueno o malo, huye de ello o lo persigue. He ahí cómo el alma jamás entiende sin el concurso de una imagen.*<sup>27</sup>

En la actividad científica, la distinción que se establece entre teoría y praxis obedece a esta misma separación que observamos entre lo experimental y las representaciones, y que el científico construye en su mente a modo de anticipo de lo que puede ocurrir; de apuesta ante lo incierto. La teoría es siempre una imagen construida, más o menos rigurosa y formal, que espera ser debatida, transformada o aniquilada. En este sentido, la imagen técnica, de sales de plata o electrónica, desempeña un doble papel en este proceso: de inspiración y de constatación de los hechos. La imagen nueva que produce un instrumento de observación, y que se hace objeto con la ayuda de la fijación química o electromagnética, es un elemento de sorpresa y admiración que conduce a la reformulación de la teoría. Pero también es un elemento de constatación y validación, (o de refutación y falsación) de lo hasta entonces tenido por válido y aceptado por común acuerdo. La imagen técnica se alinea de este modo junto a los hechos. En realidad, no niega ni afirma nada, tan sólo muestra. La verdad o falsedad de lo descubierto pertenece al lenguaje, a la lógica, al pensamiento. Esto mismo podría adjudicarse a la imagen mental.

*Las imágenes (representaciones) se adelantan a las sensaciones para enjuiciar su peligro o su placer. Obra, calcula y delibera para querer. El intelecto en acto se identifica con sus objetos.*<sup>28</sup>

*De ahí que, careciendo de sensación, no sería posible ni aprender ni comprender. De ahí también que cuando se contempla intelectualmente, se contempla a la vez necesariamente alguna imagen: es que las imágenes son como sensaciones sólo que sin materia.*<sup>29</sup>

*La imaginación es, por lo demás, algo distinto de la afirmación y de la negación, ya que la verdad y la falsedad consisten en una composición de conceptos. En cuanto a los conceptos primeros, ¿en qué se distinguirán de las imágenes? ¿no cabría decir que ni estos ni los demás conceptos son imágenes; si bien nunca se dan sin imágenes.*<sup>30</sup>

Desde la época clásica griega, se ha acordado que las imágenes dependen de la luz. Los defensores de los sentidos como vía al conocimiento pensaron que fluían de los objetos a los ojos, como membranas o películas que se desprendían de las cosas y llegaban a nuestros sentidos. El idealismo, por el contrario, defendió el poder de nuestra mirada como artífice de la visibilidad de los fenómenos. La proyección de los haces de luz (conocimiento) deviene, en este caso, de nuestros propios ojos. Son ellos los que alumbran los objetos, a semejanza de nuestra mente que da sentido al mundo. Por el contrario, Epicuro, defensor acérrimo de lo sensorial, hasta llegó a afirmar que las imágenes reales percibidas podrían asemejarse a las mentales: la imagen como emanación, desprendimiento, *simulacro*.

*No sería posible, por cierto, la igualdad de las imágenes - tanto de las que proceden del objeto, como de las que vemos en sueños o gracias a otras intuiciones de la mente o de los restantes criterios- con las cosas reales y que llamamos verdaderas, si no existieran emanaciones tales como nosotros las hemos descrito.*<sup>31</sup>

La dialéctica establecida entre la imagen real – observada en un objeto o en una reproducción técnica-, y la imagen mental, ha estado presente en el devenir de la ciencia durante siglos, por la sencilla razón de que esta fluctuación entre seres observados y seres representados pertenece a la dinámica del conocer humano. Pasado el primer estadio sensorio- motor de la infancia, y antes de entrar en la formación de los conceptos propiamente dichos, se produce un estado fronterizo caracterizado por las primeras representaciones de los objetos en la mente del niño. Es un proceso paulatino en el que los objetos y las acciones comienzan a perdurar aún cuando han desaparecido de la vista y del contacto inmediato. Quiere esto decir que el mundo conceptual que se le avecina tiene como precursor y base el mundo de la representación, de las imágenes mentales<sup>32</sup>. A partir de ese momento, la inteligencia y la adquisición de conocimiento se alimentan de estos simulacros, de esos elementos visuales que estarán presente en la formación de conceptos y en los procesos de abstracción junto al lenguaje, la lógica o las ideas. La internalización de las acciones vividas y experimentadas se convierte en una herramienta cognitiva de aplicación continua a lo largo de la vida. De la acción propia del recién nacido, se pasa a la representación, y de aquí al concepto en un proceso dinámico que tanto recuerda el quehacer científico. El conocimiento, la reflexión o el razonamiento por representaciones estará presente en todos los periodos cognitivos pre- operacionales, ligados a los objetos, y en el pensamiento maduro, abstracto, regido por operaciones formales lógico- matemáticas. La interrelación entre la observación, tanto externa como interna, y la abstracción, tal como sucede en ciencia, se mantiene en todo proceso de adquisición de conocimiento. El periodo de las *operaciones formales*, tal como lo describe Piaget, es la fase en la que el sujeto puede prescindir de lo observado, de los propios objetos, para hilvanar pensamientos sobre pensamientos, acciones sobre acciones.

*Este poder de formar operaciones sobre operaciones es el que permite al conocimiento sobrepasar lo real y el que le abre la vía indefinida de los posibles por medio de la combinatoria, liberándose entonces de las construcciones paso a paso a las que estaban sometidas las operaciones concretas.*<sup>33</sup>

Sin embargo, las imágenes siempre estarán ahí, mezcladas con las palabras, las ideas y los razonamientos. La historia de la ciencia nos enseña cómo los cuerpos teóricos más sobresalientes han guardado siempre una relación muy



estrecha con las imágenes mentales producidas en la vigilia o en el sueño de los científicos. Porque nuestra mente siempre completa lo que observa, especialmente, si de lo que se trata es de una imagen artificial que vemos en cualquier esquina, película, o libro. No digamos en un laboratorio. La imaginación desborda la imagen, la ensancha, le da vida con los sentimientos y con la biografía de cada uno, con los propios miedos y deseos. Si la imagen fuera sólo materia, indiferente, no nos sentiríamos tan atraídos por ella. El poder embaucador de las imágenes se debe a ese componente subjetivo que añade la mente, particularmente el que escapa a la conciencia.

La utilización de los enteógenos o drogas psicotrópicas para la formación de las imágenes y representaciones divinas, es una práctica pre- científica que ha ensanchado desde siempre la visión humana de los hechiceros y los artistas. Para la ciencia, esa visión sobrenatural debe formalizarse necesariamente, cobrar sentido en el mundo físico de donde procede. El valor connotativo de la imagen científica es la teoría, y ésta se alimenta de ambos tipos de imágenes: externas e internas, o lo que es lo mismo, de imágenes y de imaginación. Esta visión abstracta representacional se encuentra en el vacío de los atomistas griegos; en Euclides, en su geometría poblada de líneas, puntos y figuras; en Al Kwarizmi, con la conversión de los problemas matemáticos en geométricos; en Descartes, en su geometría analítica y el eje de coordenadas; en los conceptos de éter, flogisto, calórico..., y en un sin fin de propuestas más o menos afortunadas que vinieron a cubrir lagunas dominadas por lo invisible. Y así hasta llegar a las geometrías más abstractas, intrínsecas a una superficie en el caso de Gauss, o de objetos relacionados y en red, tal como aparece en Riemann. No estaría mal proponer una suerte de *iconología genética*, al comprobarse que estas mismas etapas en la comprensión del espacio se reproducen en las etapas psicogenéticas de los seres humanos. La percepción de los objetos marcha a lo largo de la vida de estados *intrafigurales* o euclidianos a *interfigurales* o cartesianos, para terminar en *transfigurales* o estructurales<sup>34</sup>. Lo mismo podría decirse de la construcción de las imágenes que acompañan estas etapas. Cuando observamos a un niño recién nacido, comprobamos cómo los estímulos que más atraen su atención, o su mirada a medio formar, son las luces intensas, los objetos muy próximos, como caras en primer plano, o las líneas repetidas y continuadas; para así, poco a poco, ir discriminando pequeños objetos y manchas informes de colores. Las imágenes fijas de dos dimensiones comienzan a atraer su atención a partir del sexto mes, junto a las esculturas o las figuras proyectadas y móviles de la televisión. La adquisición de la tridimensionalidad, de las figuras abstractas, de la comprensión del color, del movimiento ilusorio, etc., se sucede hasta llegar a la abstracción de los diferentes espacios, o de los fenómenos en el tiempo. Atender a esta dimensión de lo icónico dentro de la psicogénesis, especialmente a partir de la toma de conciencia de las imágenes por el niño, o en su dimensión histórica, tomando como base la entrada en escena de la fotografía, abre un campo de investigación de sumo interés para la ciencia.

A un mismo tiempo, la formación de la imagen mental que todos nos hacemos del mundo exterior sigue un proceso evolutivo en la mente humana desde su nacimiento. En un momento determinado del desarrollo psicofisiológico, a esa imagen se añade la imagen de uno mismo. El espejo juega un papel fundamental en este proceso. Esta imagen de lo que somos sufre una continua transformación a lo largo de los años quedando extraordinariamente marcada por la cultura y los valores que ésta impone a través de sus productos, en gran medida iconográficos.

*A lo largo de amplios períodos históricos, las características de la percepción sensorial de las comunidades humanas van cambiando a medida que cambia su modo global de existencia.*<sup>35</sup>

La imagen tecnológica, especialmente la fotografía y el cine, incide de manera determinante en este proceso. La adecuación de la persona y de la imagen de sí mismo a esa otra imagen idealizada, tecnológica y cultural, que produce la sociedad y el entramado socio- económico fluctúa alrededor de una línea imaginaria cuyos extremos los encontramos en el narcisismo y en la enfermedad, tal como en lo social lo encontramos en la sumisión y en los procesos revolucionarios. Al héroe y al mito se opone la desestabilización de la personalidad. Los procesos psicopatológicos en los que la imagen juega un papel fundamental conducen a prototipos antagónicos con el modelo estandarizado e idealizado: obesos, anoréxicos, marginados, enfermos terminales, viejos y, en última instancia, el arquetipo enfermo y desestabilizador por antonomasia de nuestras sociedades modernas: el yonky.

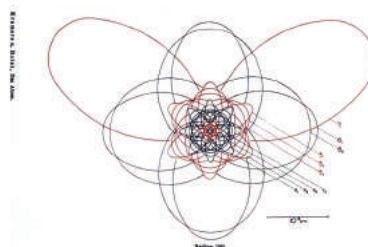
La contención de la actividad científica, por el contrario, hace que sus productos aparezcan gélidos y controlados. La imaginación en la ciencia y el arte difiere en este sentido sustancialmente. Lo extremadamente fantástico y grotesco está reservado para el arte, religioso o no, donde puede forzarse la situación hasta límites insospechados con la invocación de imágenes alteradoras y desestabilizadoras de la propia personalidad. El cartel de *no recomendada para menores de...* no es garantía de que el daño psicológico sobrepase cualquier edad o fortaleza psíquica. La mercantilización que la industria iconográfica actual lleva a cabo de lo horrendo, diabólico y perverso supera los límites fijados por el mismísimo Sade, con la diferencia de que se trata ahora de productos de consumo de masas. Y a las imágenes producidas hay que añadir las imágenes suscitadas en el interior de nosotros mismos, con resultados incontrolables. La fuerza de lo que no se ve supera con creces lo manifiesto.

En el caso de la ciencia se respira un cierto alivio. Lo connotado en este caso se racionaliza. Toda emoción es descartada. La imagen aquí es una extensión de lo real, y como tal es susceptible del análisis científico pormenorizado. Se convierte en una herramienta para el conocimiento. La inspiración que los científicos encuentran para estructurar las teorías nace de otra suerte de imágenes, más allá de las figuras geométricas propuestas por Euclides y Descartes. Por ejemplo, se dice que A. Kekulé, químico alemán del XIX, ideó en 1861 la estructura molecular del benceno a partir de un sueño con una serpiente que se mordía la cola. Se trata del ouroboros, un símbolo antiquísimo, presente en un manuscrito griego del siglo III a d C. El anillo cerrado del carbono, que da forma a la estructura del benceno, vendría representado por este ciclo o bucle, símbolo del eterno retorno<sup>36</sup>. También Descartes, Gauss, y Poincaré adjudican algunas de sus intuiciones y formulaciones a sueños o experiencias místicas o de inspiración espontánea en medio de la noche<sup>37</sup>. En la historia de la ciencia, es fácil comprobar hasta qué punto las imágenes reales y ficticias han estado presentes en la formulación de teorías de amplio calado en el avance científico<sup>38</sup>. Las figuras formadas en las fulguritas y en las superficies polvorosas por la acción de las descargas eléctricas, observadas por Lichtenberg (ver Figs. 2.44 y 2.45.), que duda cabe que ayudaron a los científicos a tomar posiciones ante los fenómenos electromagnéticos. O las líneas concéntricas formadas en el papel por las limaduras de hierro sometidas a la acción de los imanes, sin duda tuvieron una gran influencia en el concepto de *líneas de fuerza* de Faraday; o en las ideas del propio Maxwell (ver Figs. 2.16, y 2.17), tal como se pone de manifiesto en los dibujos y esquemas que acompañaron sus teorías. Es difícil asegurar hasta qué punto este tipo de ideas proviene de la observación directa de un fenómeno, de la observación de una imagen, o del proceso de imaginación de los científicos; lo que sí es cierto es que las dos primeras contribuyen a la gestación de la última en un proceso creador que aglutina logos, palabras e imágenes. Qué es el demonio de Maxwell sino un golpe de imaginación en plena impotencia de los físicos de la termodinámica, llenos de ansia por explicar el comportamiento de los gases, por cerrar el círculo

interminable de las pesquisas, de la construcción teórica. O qué duda cabe que el universo relativista de Einstein se alimentó de los resultados de la experiencia de Michelson- Morley, de las espectrografías que pusieron en evidencia los efectos Zeeman y Doppler- Fizeau, o de las imágenes teóricas de Fitzgerald acerca de la contracción de los cuerpos sometidos a grandes velocidades. La abstracción pura, incluso de la física matemática, se sostiene en algún momento en procesos visuales internos. O en elementos sensoriales de otra índole, como es el caso de la formulación de la teoría cuántica por Max Planck, y su posible relación con la distintas formas de afinación de los instrumentos musicales (natural, atemperada, justa), tal como se desprende de su memorias<sup>39</sup> y de su estrecha amistad con el músico y físico Carl Andreas Eitz, constructor de un instrumento para la visualización de las ondas<sup>40</sup>.

*Soy de la opinión de que el objetivo de la teoría consiste en construir una imagen del mundo externo que existe sencillamente en nuestro interior; debiendo ser nuestra estrella guía en todo pensamiento y experimento; o sea, completando, como si lo fuera, el proceso del pensamiento y desarrollando globalmente lo que en pequeña escala ocurre dentro de nosotros cada vez que nos formamos una idea.*<sup>41</sup>

Las imágenes se suceden mezcladas con la intuición y la construcción de las teorías físicas de los científicos a lo largo del siglo XX. Recordemos los universos atómicos de Rutherford y de Bohr (Figura 7.1.), completados con las imágenes de las órbitas elípticas de A. Sommerfeld, y S. Goudsmit, y del spin de los electrones, de G. Uhlenbeck; los dibujos premonitorios de W. Bragg sobre el trazado de las partículas atómicas (ver Fig. 3.15), o propuestas más prosaicas, como las del gato de Schrödinger para contradecir el exceso de confianza en los modelos puramente formales de la mecánica cuántica. En el terreno de la biología molecular, gran estrella de la ciencia de la segunda mitad del siglo pasado, encontramos paradigmático el descubrimiento de la estructura replicativa del ADN a cargo de Watson y Crick. La imaginación y atrevimiento de estos autores, al adentrarse sin miedo en las lindes de las hipótesis, jugaron a su favor en detrimento del apego a lo puramente experimental, en este caso, del comportamiento ejemplar de Rosalind Franklin y de sus fotografías reveladoras de dicha estructura (ver Cap. 6.2.94.). Este proceso de concatenación sin fin que se establece entre imagen e imaginación lo vemos también claramente en lo ocurrido con el enunciado de la doble naturaleza de la luz y la materia, como ondas y partículas, nudo gordiano de la física moderna. Las fotografías obtenidas con la cámara de niebla y la difracción de electrones mostraron una serie de puntos y manchas que había que interpretar debidamente. Lo más plausible fue defender que las ondas están formadas de corpúsculos. La continuidad y discontinuidad de los fenómenos, par irresoluble desde Heráclito, quedaban fusionadas de este modo por la física cuántica. Ahora bien, la posición y velocidad de esos átomos atrapados en la forma de las ondas, al no poder ser determinados con precisión causal, abría las puertas al indeterminismo, a la probabilidad, a la contingencia. Observación de hechos, interpretación, y vuelta a la observación que confirme o refute lo interpretado o imaginado conforma el ciclo sin fin del método científico: ver para creer.



**Figura 7.1. Dibujo de las órbitas del átomo de Bohr. H. K. Kramers. 1925.**

Aquí nace un foco de polémica de gran trascendencia para la ciencia experimental y teórica, entre aquellos que prefieren apoyarse en la evidencia de las imágenes o en la intuición de lo posiblemente existente a través de los resultados y efectos experimentados; y aquellos que prefieren pensar en términos de entes, cuya identidad y virtualidad cobran sentido en la teoría y en el seno de relaciones formales establecidas hipotéticamente. La fe ciega en las matemáticas de esta última posición, puede acarrear ciertos riesgos. ¿Está reñida la abstracción formal con la abstracción visual, o el pensamiento por palabras con la imaginación? ¿O son dos formas de edificar mundos atrevidos de una belleza insondable?

*Por tanto, puede ocurrirle al matemático, que está ocupado constantemente con sus fórmulas y cegado por su perfección interna, que tome sus relaciones mutuas como realmente existentes, y acabe de espaldas al mundo real.<sup>42</sup>*

*La adquisición de mayores poderes de abstracción debilita la imaginación visual. El arte de escribir, que en cierto sentido puede decirse que constituye la memoria de la humanidad, al mismo tiempo, destruye esa memoria al externalizarla.<sup>43</sup>*

*El poeta y el matemático son los dos grandes impugnadores del desorden.*

...

*Ambos representan la última vuelta de tuerca que la mente humana ejerce sobre la realidad, la capacidad, o más bien la compulsión de la conciencia de generalizar más allá de los hechos concretos, para construir imaginativamente e imponer al mundo una belleza viva.<sup>44</sup>*

Un aspecto relevante en la construcción de estas *imágenes físicas*, o representaciones mentales de los científicos, es hasta qué punto el universo iconográfico construido a partir del nacimiento de la fotografía ha contribuido a este proceso. No me refiero al impacto directo que ha tenido la imagen científica en la adquisición de conocimiento, sino en qué medida la cultura iconográfica en su conjunto, a través de sus productos, de su tecnología, de su masificación y de sus usos por el poder y la sociedad, han afectado el razonamiento científico.

*Eso que hemos llamado hipótesis podría haber sido llamado igualmente imagen o representación o modelo de la naturaleza. No se propone retratar la realidad de la naturaleza, sino sólo lo que de ella vemos, los fenómenos de la naturaleza. Reproduce todos los fenómenos en nuestro conocimiento con perfecta fidelidad, y, sin embargo, difiere de la realidad, en su esencia, lo mismo que una fotografía difiere del modelo viviente, por faltarle el colorido, el relieve y todas las cualidades vitales. Los elementos de esa imagen son necesariamente conceptos con los que nuestra mente está familiarizada, pues de lo contrario no podríamos haber hecho dicha imagen<sup>45</sup>.*



Los científicos no son ajenos a una cultura en la que la imagen ha irrumpido con tal virulencia. La fotografía, el cine, la televisión y el resto de sistemas de reproducción técnica han contribuido a la formación de una sociedad nueva que ve diferente y que se ve a sí misma diferente. El arte del siglo XX se ha encargado de mostrarnos esta nueva dimensión del ser humano a través de obras en las que la cultura de masas queda reflejada, o en la que el propio arte y sus productos son motivo de inspiración y reflexión para nuevas obras. Las imágenes se engullen unas a otras, presas de una cultura que todo lo quiere observar y exponer al ritmo de una nueva industria de lo audiovisual. En el terreno científico ¿sería aventurado afirmar que la magia del procedimiento fotográfico: de una imagen latente que se hace manifiesta, guarda una estrecha relación con la formulación de la teoría del sueño de Sigmund Freud? ¿O que el modelo de *máquina universal* de Alan Turing se inspira en la técnica de la grabación sonora y cinematográfica? Qué duda cabe de que la ingente producción de obras iconográficas a lo largo de los dos últimos siglos ha hecho cambiar la percepción del mundo no sólo de los artistas sino de los científicos.

La epistemología científica ha experimentado un continuo vaivén entre lo subjetivo y lo objetivo en estos dos últimos siglos de imagen tecnológica. La fuerza objetivadora de la fotografía supuso un fuerte respaldo del positivismo y de los diferentes materialismos. El espíritu del XIX fue buscar la *cientificación* de cada parcela de la vida. El realismo y el naturalismo en arte y literatura alimentaron este afán, creando obras maestras a modo de grandes murales fotográficos de la condición humana. Zola, Balzac, Flaubert, Dickens, Dostoyewski, Clarín, Galdós y tantos otros miraron el mundo con los mismos ojos que la fotografía documental de aquellos años. El materialismo dialéctico, como filosofía para la acción, intentó extender esta racionalización a los procesos sociales, y de paso cambiar el curso de la historia. Hoy nos ha quedado claro que las premoniciones que pueden esgrimirse con el uso de los sistemas cerrados y reversibles de la física, no son trasladables a los sistemas complejos y abiertos que regulan las sociedades humanas.

*Y lo mismo ocurre con la producción espiritual, tal y como se manifiesta en el lenguaje de la política, de las leyes, de la moral, de la religión, de la metafísica, etc.; de un pueblo. Los hombres son los productores de sus representaciones, de sus ideas, etc., pero los hombres reales y actuantes, tal y como se hallan condicionados por un determinado desarrollo de sus fuerzas productivas y por el intercambio que a él corresponde, hasta llegar a sus formaciones más amplias. La conciencia no puede ser nunca otra cosa que el ser consciente, y el ser de los hombres es un proceso de vida real. Y si en toda la ideología los hombres y sus relaciones aparecen invertidos como en una cámara oscura, este fenómeno responde a su proceso histórico de vida, como la inversión de los objetos al proyectarse sobre la retina responde a su proceso de vida directamente físico.*<sup>46</sup>

Pero estas mismas relaciones de poder, acompañadas del avance de la ciencia en otras lindes del conocimiento, comenzaron a resquebrajar esta fe ciega en lo objetivo y real, en lo experimental y en la separación drástica de un yo independiente de la naturaleza. El electromagnetismo, la termodinámica o el evolucionismo pusieron en práctica nuevos modelos de aproximación al estudio de lo natural, haciendo tambalear el esquema clásico de hacer ciencia. Lo probable exigía un puesto de importancia junto a lo necesario. El propio Ernst Mach

reivindicó el componente subjetivo de la epistemología, en gran parte llevado por los resultados de una intensa investigación en el campo de la fotografía estereoscópica y de alta velocidad. Que la información obtenida a partir de lo sensible pueda variar sustancialmente dependiendo del ángulo de observación, tal como ocurre con la estereoscopia, aparte de haber supuesto un punto de inspiración a Einstein para formular su teoría de la relatividad, fue un elemento determinante en Mach a la hora de otorgar un puesto de primacía a los *elementos* sensibles, tal como él los denominaba, por encima de los hechos materiales<sup>47</sup>. El gran acierto de la epistemología científica propuesta por Mach se debe a la reivindicación, desde el lado de las ciencias físicas, de un puesto de igualdad para los hechos psíquicos, las representaciones y los conceptos. La psicología de la percepción y de las sensaciones, y la fisiología pasaron a ocupar en su obra un lugar destacado, como elementos claves en el proceso de adquisición de conocimiento. Este exceso de psicologismo fue duramente criticado por el marxismo oficial de la época, de forma especial por V. I. Lenin<sup>48</sup>. Eran tiempos de intransigencia en lo político y en lo intelectual. La lucha encarnizada entre el trabajo y el capital en torno al cambio de siglo se tradujo en una división social drástica que afectó por igual a la comunidad científica. La capacidad sensible de la materia orgánica o inorgánica, factor primordial para Mach en la adquisición de conocimiento, se convirtió en un elemento intolerable para el discurso materialista.

*La materia no es para nosotros lo primeramente dado. Lo primitivamente dado para nosotros son los elementos que, en cierto respecto, ya conocido, pueden designarse como sensaciones. Toda cuestión científica que pueda tener sentido para un individuo humano, se refiere únicamente a la explicación de los elementos de unos y otros.*

*Lo que llamamos materia es una cierta composición regular de elementos (sensaciones). Las sensaciones de los diferentes sentidos de un hombre, así como las de diferentes hombres, dependen unas de otras, según ley. En esto consiste la materia.*<sup>49</sup>

Pasado un siglo de la reyerta, es interesante mirar hacia atrás desde estos primeros años del siglo XXI para comprobar cómo a pesar de la oposición marxista, la epistemología de Mach caló muy hondo en la ciencia moderna, en especial sobre figuras como Hertz, Dingler o Einstein. La concesión hecha en exceso a las emociones no fue motivo para que la ciencia abandonara un pensamiento rico y riguroso, y a un autor profundamente imbuido del método científico. Hay que reconocer que el fenomenismo y el positivismo lógico están fuertemente arraigados en la comunidad científica, mientras que el materialismo dialéctico acusa el lastre de un quehacer científico asociado al dogmatismo y a la derrota de una gran potencia. Sería un error para la ciencia, sin embargo, actuar de espaldas a una filosofía milenaria, olvidando que los procesos dialécticos pertenecen al curso de lo natural tanto o más que los causales o de retroalimentación. O que no sería desventurado comprender los avances de la física moderna desde la acepción materialista de esta escuela, que atribuye el movimiento de los cuerpos y los procesos históricos al ciclo inagotable producido por la confrontación de fuerzas contrarias y a la síntesis que nace de ésta en el plano de lo real y concreto<sup>50</sup>.

Se esté o no en lo cierto, la lección aprendida por la historia en el terreno de la epistemología es la exigencia de un lugar preeminente para el sujeto en el proceso de adquisición de conocimiento.

*De aquí resulta que razonamos actualmente sobre estos campos separados y artificialmente simplificados, pues la física hasta ahora sólo es la ciencia de los objetos que no son vivos ni conscientes. El día en que se haga más “general” y llegue a lo que sucede en la materia de un cuerpo que está viviendo o incluso usando la razón, el enriquecimiento epistemológico del objeto mediante el sujeto, como establecemos en nuestra hipótesis, tal vez aparecerá como una simple ley relativista de perspectiva o de coordinación de referenciales, mostrando al mismo tiempo que, para el sujeto, el objeto no podría ser distinto de lo que parece, pero también que desde el punto de vista de los objetos el sujeto no podría ser diferente.<sup>51</sup>*

Esta subjetivización ha producido una gran mella en el curso de la ciencia del pasado siglo, la irrupción de la psicología como ciencia, la atención prestada al puesto del observador en la teoría de la relatividad o en la mecánica cuántica, o atender a los componentes innatos, más allá de lo metafísico, presentes en los mecanismos de la herencia, del lenguaje o del aprendizaje, son ejemplos de ello. En el ámbito de la imagen tecnológica es a todas luces evidente el lugar preeminente que ocupan los elementos subjetivos a la hora de la producción y valoración de sus productos. La imagen está siempre referida a un observador que condiciona la forma de apreciación de la misma a partir de su estructura orgánica y mental. Conocemos de sobra las implicaciones tan complejas que supone el uso del color en las obras visuales, o los componentes psicológicos que participan en los procesos de percepción e ilusión. Valga entresacar en este contexto la importancia de los parámetros de brillo y luminancia, tan decisivos en la creación de imágenes tecnológicas, y su relación con la dualidad sujeto- objeto de la que hablamos. Los términos de *brillo* y *luminancia* hacen mención a los valores subjetivos y objetivos, respectivamente, que damos a un estímulo luminoso, ya sea una luz o un objeto que la refleja. La relación entre ambos términos es ambigua. Mientras la luminancia responde a una cantidad mensurable por instrumentos como el fotómetro, el brillo responde a una sensación interna del ser humano, por lo que se trata de una variable psicológica que sólo puede ser medida en términos comparativos, siempre que las condiciones de medición sean lo más controladas posible<sup>52</sup>.

Concluyendo, cabría decir que volvemos a encontrar la dualidad ser-pensamiento en las disquisiciones de carácter epistemológico acerca de la imagen real y la imagen mental, o de la observación y la creación de conceptos. Para los productores y consumidores de imagen tecnológica esta dicotomía puede adquirir un sentido práctico a la hora de valorar y ubicar las obras. La imagen, la representación y los conceptos no escapan a la realidad social en la que se producen. Existe un doble camino en la interpretación del mundo, trasladable al análisis de la imagen técnica: de la acción y la percepción a la representación y a los conceptos; o el camino inverso. El realismo y el idealismo de las imágenes adoptan una y otra vía. La defensa de la razón pasa por adecuar nuestro trabajo a las exigencias de la naturaleza, lo contrario sería abrir una puerta al irracionalismo.

*Pues bien, el irracionalismo arranca de esta - necesaria e insuperable, pero siempre relativa- discrepancia entre la imagen mental y el original objetivo. El punto de partida consiste en que los problemas directamente planteados al pensamiento en cada caso, en tanto que tales problemas no resueltos, se presentan bajo una*

*forma en la que parece, a primera vista, como si el pensamiento, los conceptos fallasen ante la realidad, como si la realidad enfrentada al pensamiento constituyera un más allá de la razón (de la racionalidad del sistema de categorías, del método conceptual hasta entonces utilizado.*

...

*¿Y si, además, haciendo de esta necesidad una virtud, se considera la incapacidad para captar mentalmente el mundo como un “conocimiento superior”, bajo la forma de la fe, la intuición, etcétera?*<sup>53</sup>

O más aún, a un nuevo idealismo. La imagen simulada se antepone al objeto, se adelanta a los acontecimientos, ya no es sombra, reflejo o índice de lo observado; el espectro numérico crea la imagen que, en este caso, suplanta el objeto. Las sombras de Platón corren el riesgo de ser resucitadas cuando se pretende que lo real se someta nuevamente al intelecto, que lo histórico se subyuga a la imagen creada; en suma, que la verdad de unos se someta a la imagen, o verdad de otros. En nuestra era de la copia, de la sociedad y economía en red, de lo visual y espectacular, existe el interés larvado por desposeer de toda autenticidad a las imágenes, bien diluyéndola en un ciberespacio infinito, bien maniatándola con montajes o pies de fotos tendenciosos, bien retocándola o edulcorándola con nuevos mitos. Contra esa información puede levantarse esa otra información, esa otra imagen, atenta a los hechos, franca y directa, que nos devuelve a lo real, a lo que somos, a la materia de donde nace toda imagen y fantasía.

## **7.7. La fotografía: expresión y conocimiento**

*Desprecia la ciencia y la razón, la mayor fuerza en que descansa el hombre...y te tendré por entero a merced mía.*

*Fausto.*<sup>17</sup>

Johann Wolfgang von Goethe

La visita a esta orilla de la imagen científica ha tenido un objetivo primordial: analizar la doble función que toda imagen tiene como vehículo de expresión y como herramienta para la adquisición de conocimiento. Acudir a la ciencia y al mundo de las representaciones que se han puesto al servicio del saber ha sido para emprender un camino de vuelta hacia la imagen expresiva, ataviados de una perspectiva más integral del fenómeno. Las ciencias de la información y de la imagen necesitan de esta visión global e interdisciplinaria, en la que tengan cabida los aspectos artísticos, técnicos, científicos y documentales del universo iconográfico. Los fotógrafos artistas y documentales tienen ante sí un instrumento y unos procesos de construcción de imágenes que se deben en gran parte a la ciencia y la tecnología; es obligación para ellos, por tanto, conocer sus fundamentos y principios. En sentido contrario, los científicos manejan unos resultados que deben ser interpretados a la luz de la creación, de la imaginación,



de la percepción y las sensaciones, del pensamiento y de la tradición; y para ello, es preciso que tengan bien presente disciplinas como el arte, la psicología, la filosofía o la historia. La imagen encierra en sí todas esas potencialidades<sup>18</sup>. ¿Existe entonces una conexión entre las ciencias naturales y las humanas a través de la imagen? ¿En qué medida los productos de una y otra son equiparables e intercambiables? Tal vez sea el momento de reivindicar un nuevo acercamiento de las artes y las ciencias, tal como ocurrió en el Renacimiento, en el que la imagen tecnológica constituya el cruce de ambos caminos. ¿Existe alguna conexión entre un paisaje de Atget, un rostro de Sanders o un rayograma de Ray; y una radiografía, un trazo de partícula, o una imagen de la luna? La visita a la orilla científica de la imagen ha tenido como objetivo primordial la búsqueda de este canal de comunicación entre las imágenes, más allá de la simple constatación de unos efectos estéticos otorgados a ciertas fotografías científicas. La aparición de la imagen tecnológica ha cambiado el modelo de interpretación de las obras artísticas y científicas. Tradicionalmente, el arte ha perseguido deleitar con la contemplación y la emoción de sus obras, a diferencia de la ciencia, cuyo fin primordial ha sido la conquista de conocimiento; sin embargo, sensación, reflexión y conocimiento se entrecruzan en las obras documentales del cine y la fotografía, o en el arte conceptual, tan representativos de la cultura moderna. La teoría del conocimiento, contemplada desde la dualidad del ser y el pensamiento, desde la materia y la idea, o desde los sentidos y la especulación, puede sernos de gran ayuda para encontrar esta vía de comunicación que necesariamente debe existir entre ambos tipos de imágenes.

Parece ser que, a simple vista, la fotografía, como el resto de los instrumentos ópticos, se alinea con el método experimental, puesto que supone una intensificación y una objetivación de las facultades que provee la observación. Tanto el telescopio, el espectroscopio como el microscopio completan sus capacidades a través de la fijación de lo observado en los soportes fotográficos; así ocurre también con los diferentes instrumentos de observación desarrollados posteriormente, como los rayos X, la cámara de niebla, la cámara de burbujas, y tantos otros instrumentos electrónicos que han hecho posible la visualización de los fenómenos físicos con la ayuda de la fotografía. Los trazos registrados en las emulsiones constituyen un punto de partida para el estudio científico, tanto cualitativo como cuantitativo. Y esas huellas de luces y sombras que quedan fijadas a los ojos del investigador -en el contexto de la dicotomía observación/especulación de la que hablamos- nos retrotraen como en tantas ocasiones al mundo de la filosofía clásica griega, concretamente a Tales y a Platón.

Ya señalé en el primer capítulo que en estos dos autores encontramos interpretaciones del mundo producido por las sombras, que se corresponden con estas posturas antagónicas dentro de la teoría del conocimiento. Para Tales, las sombras son elementos presentes en la naturaleza, de los que podemos inferir y adquirir conocimiento. Por el contrario, las sombras en Platón representan el mundo de las entelegías. Lo que podemos conocer de la realidad y de los objetos son precisamente sombras, pero en el sentido de apariencias, de espejismos, de reminiscencias. La posición del ser humano enclaustrado en la mítica caverna, que tan sólo tiene acceso a la realidad a través de sombras proyectadas en sus paredes, es redimida exclusivamente por la formación de las ideas. Lo importante aquí son las estructuras, el orden o las formas presentes en la naturaleza, que vamos desvelando a través de la actividad filosófico-religiosa, artística o científica. De aquí que el platonismo tuviera su continuidad en el cristianismo reformulado por la figura de San Pablo, en multitud de sistemas filosóficos que giraron en torno al idealismo, en la obra de numerosos artistas plásticos o en las teorías de innumerables científicos. En su conjunto, todos ellos terminan por anteponer la

búsqueda de esencias formales, de la Idea, o la *belleza* de los números, a la información proporcionada por los sentidos a partir de los objetos de la naturaleza.

En el campo de la ciencia, la mecánica cuántica, -desarrollada, entre otros, por Niels Bohr y Werner Heisenberg a partir de la obra de Max Planck- situó en la encrucijada la observación como elemento crucial del método científico y puso en cuestión el significado de lo que vemos: en este caso, las fotografías proporcionadas por la cámara de niebla y los espectrógrafos.

*Puede que fuera esa misma noche hacia las doce cuando recordé de pronto mi conversación con Einstein. Me vinieron a la mente sus palabras: “Solo la teoría decide qué es lo que uno puede observar”. Inmediatamente lo tuve claro: aquí había que buscar la llave de esa puerta que había estado tanto tiempo cerrada. Me fui a pasear por la noche por el parque de Fälld para reflexionar sobre las consecuencias de las palabras de Einstein. Siempre habíamos dicho a la ligera que se puede observar la trayectoria del átomo en la cámara de niebla. Pero quizás era menos lo que se observaba realmente. Tal vez lo que se veía era sólo una sucesión discreta de puntos del electrón imprecisamente determinados.<sup>19</sup>*

Las *relaciones de indeterminación*, famoso enunciado formulado en 1927 por Werner Heisenberg, se fundamentan en este hecho y en el comportamiento aleatorio de las partículas atómicas, tal como quedó patente en los contadores y centelleadores. Para este científico los datos sensoriales desvelados por las fotografías se caracterizan por su unicidad y valor relativo; como mucho será el conjunto de una serie de placas lo que podrá constituir una verificación, eso sí, puramente estadística, del fenómeno estudiado. El conocimiento verdadero sería entonces el que nace del mundo de las formas, por lo que las partículas íntimas de lo atómico ya no serán en sí objetos reales, sino que lo serán las estructuras que las identifica y las une. Lo real serán estas formas: los triángulos y cuadrados de los que nos habla Platón en el *Timeo* y no los átomos, tal como fueron descritos por Demócrito o Epicuro, o las partículas cuyos trazos quedan recogidos por las placas fotográficas. Desde ese momento la ciencia se divide entre aquellos que abogan por un indeterminismo inherente a todo conocimiento humano y quienes siguen aspirando a mantener el espíritu de la física clásica. Unos defenderán lo posible ante lo fáctico, los otros afirmarán insistentemente, tal como hizo Einstein, que *Dios no juega a los dados*. Para los primeros, los resultados de la observación se relativizan, cada imagen obtenida en un experimento será única y sólo la repetición de las observaciones nos aportará un conocimiento aproximado, estadístico, de los fenómenos. Las consecuencias de esta división no se hicieron esperar. Lo mismo ocurriría en el lenguaje: lo fotografiado nos obliga a expresarnos en términos de física clásica; en cambio, los nuevos conceptos de la mecánica cuántica se alejan de ese tipo de descripciones. Esa es la paradoja, una vez que nos adentramos en el universo atómico, las máquinas de observación afectan al comportamiento de lo observado. Para los segundos, en cambio, todo este revuelo obedece a una situación transitoria en el estado de la ciencia, pues tarde o temprano podremos volver a fijar leyes causales en los fenómenos.

Sin embargo, para el tema que nos ocupa, lo importante es la delimitación que surge en estos momentos en el seno de la física, en esa franja que separa la imagen técnica de la imagen mental. Tras un siglo de avance científico en el que la fotografía desempeña un papel decisivo -no debemos olvidar que el estudio de lo minúsculo a través del microscopio y de la cámara de niebla fundamentalmente,

de lo recóndito a través del telescopio y el espectroscopio, y del análisis del movimiento, no hubieran sido posible sin la participación de la fotografía-, la ciencia entra en una nueva dimensión con la formulación de la teoría de la relatividad y la teoría cuántica, ambas nacidas para explicar una serie de fenómenos físicos imposibles de interpretar con los postulados de la física clásica. La distribución de la energía en los espectros producidos por los cuerpos sometidos a diferentes temperaturas, el efecto Zeeman, el Doppler-Fizeau, la experiencia de Michelson-Morley, etc., obligaron a una reformulación de las leyes de naturaleza de acuerdo a nuevas imágenes teóricas, como fueron las de onda-corpúsculo en la nueva teoría de la luz y de la materia, la de la yuxtaposición de los sistemas inerciales en la relatividad, los cuantos de acción de Planck, las relaciones de indeterminación y la idea de complementariedad en la Mecánica cuántica, etc., que pudieran dar cabida a esos nuevos fenómenos constatados en el universo atómico e interestelar. Pero, ¿qué imagen sigue a cuál? Para unos, tantos los instrumentos de observación como el qué observar nacen de las teorías, son ellas las que dicen qué hacer y cómo construir los aparatos; para otros, sigue siendo la naturaleza la que dicta el camino en su actuación sobre los sentidos; la que, siguiendo a Francis Bacon, impone la medida de las cosas.

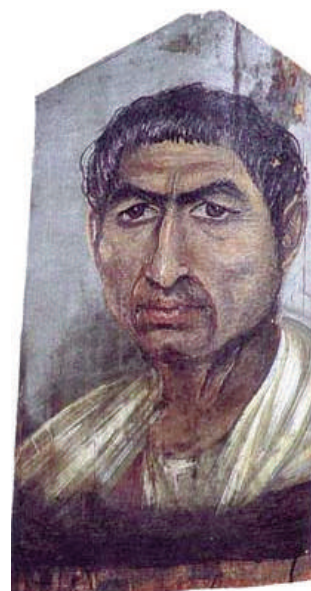


*Figura 7.2. Hermes con Dionisos joven. (detalle) h. 340 a. C. Praxíteles.*

abstracción y realidad. La fotografía expresiva tampoco escapa a esa polarización cuyos extremos afectan a todo arte: el idealismo y el naturalismo. De aquí, que el cuestionamiento de la observación y la huida hacia universos formales que se produce en determinadas formas de hacer ciencia encuentre su correlato en la construcción de mundos sublimados y en la huida hacia modelos más estilizados de representación artística. Obviamente, todo arte construye un mundo simbólico e ideal cuya finalidad es la reflexión o la emoción de quien lo contempla; así también, todo arte cumple una función social y ética dentro de la sociedad donde se produce. Se trata aquí de ahondar en los extremos de estas posiciones, en esos límites que la propia fotografía nos ha ofrecido a lo largo de los años, entre esos dos polos que podemos situar entre lo documental y lo artístico.

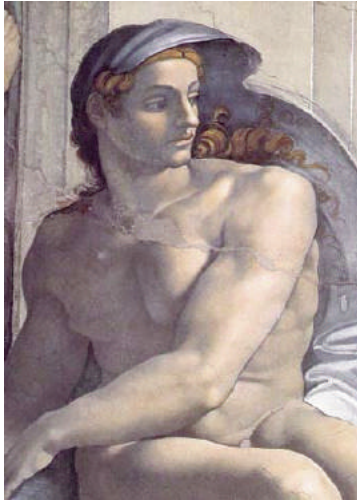
En el mundo clásico ya encontramos esta distinción. Las obras resultantes de los cánones que rigen un

Llegados a este punto es preciso dar un salto y atreverse a emparejar la actividad científica con la artística, pues la fotografía es un fenómeno y un instrumento que nos posibilita este ejercicio por encontrarse viva y presente en estas dos caras del quehacer humano. Se trata de un producto nacido de la mecánica, de la óptica, de la física-química y recientemente de la electrónica, cuyas obras han subvertido los pilares tanto de la ciencia como del arte. De ella debe surgir, por consiguiente, un lugar de encuentro que relacione estas dos actividades humanas: la expresión y el conocimiento. Y la respuesta la podemos encontrar en esa misma dualidad ancestral que ha condicionado el desarrollo científico. También en la expresión artística se encuentra el antagonismo entre idea y materia, entre



*Figura 7.3. Retrato de hombre, h. 100. Pintado sobre cera caliente, en una momia hallada en Hawara, Egipto.*



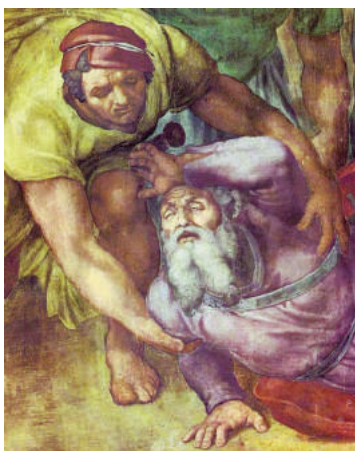


**Figura 7.4. Desnudo encima de la Persica. Michelangelo.**

determinado tipo de escultura clásica, tanto griega como romana, nacidos de postulados geométricos compartidos por la escuela pitagórica o la Academia platónica, obedecen a principios y funciones muy contrarias a lo que será la escultura narrativa de los frisos de los templos, llevadas a cabo por autores anónimos, o a las pinturas funerarias de Al Fayum, por citar dos ejemplos. La idealización de los cuerpos marmóreos levantados por Policeto, Fidias o Praxíteles queda muy lejos de estas pinturas, recientemente rescatadas para la historia del arte, llenas de realismo y color, que se levantan como piezas documentales de primer orden en los sarcófagos y momias del Egipto del siglo I y II de nuestra era. La fotografía necrológica del XIX - o la que encontramos hoy día en las lápidas de nuestros cementerios o en muchos de nuestros hogares en recuerdo de nuestros seres queridos- entronca de lleno con esa tradición de culto a los muertos que ambas expresiones naturalistas comparten. Esta polaridad

entre naturalismo y estilización en arte será una constante que se reproducirá a lo largo de la historia con mayor o menor intensidad, dependiendo de los artistas o de las escuelas. (Figura 7. 2; y 7. 3)

Dando un salto en el tiempo, esta doble tendencia la podemos comprobar en cierto momento del Renacimiento, en las obras de Leonardo y Miguel Angel (Figura 7.4; y 7.5). No es casualidad que este último se represente como San Pablo caído del caballo en la hora de su conversión, idealizándose a sí mismo como el gran edificador de la iglesia, y sublimando asimismo, en línea con el neoplatonismo en boga, a toda la galería de sus figuras clásicas, personajes bíblicos o banqueros ilustres, creando así un mundo propio e idealizado, de sensualidad contenida, ahistórico e intemporal (Figura 7.6). La belleza, nuevamente, se encuentra encerrada en un orden sublime, en formas sobrenaturales, en la Idea platónica que obedece a una interpretación personal y subjetiva del pintor. En cambio, si volvemos



**Figura 7.6. Conversión de Saulo. 1542- 45. Miguel Angel. (Detalle)**

nuestra mirada a Leonardo, encontramos de pleno la realidad vista a través de los instrumentos ópticos de la época: la cámara oscura, los vidrios, los velos tenues montados sobre bastidores, de la perspectiva puesta al servicio de los modelos, siempre al natural, y cuyo resultado son esos retratos sencillos, pero a la vez grandiosos, de miradas llenas de verdad y vida, de ojos encendidos que se dirigen al espectador a través de un cándido sfumato, de luminosidad *submarina*, conseguida con el estudio concentrado y científico de la luz. *El Tratado de la Pintura* es todo un manual de información y técnica apropiado no sólo para pintores retratistas o paisajistas, sino para todo fotógrafo.



**Figura 7.5. Retrato de músico, 1485- 90. Leonardo da Vinci.**





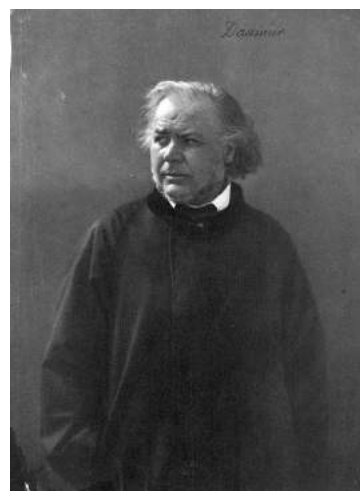
*Figura 7.7. And Enid Sang.*  
*Julia Margaret Cameron.*  
1874

Llegados al siglo de la fotografía, el mismo siglo del positivismo y del marxismo, las tendencias naturalistas de la fotografía primera ya se ven enfrentadas con los primeros idealizadores de la realidad, que aprovecharon la falta de foco y de nitidez, o los fallos en las copias, propios de las primeras técnicas, para acercarse a la pintura. La polémica estaba servida: realistas contra pictoricistas, Nadar contra Cameron, naturalismo contra prerrafaelismo, *impresionismo científico* contra simbolismo (Figuras 7.7 y 7.8). El realismo, en verdad, ya había cumplido con creces su función revolucionaria desde la aparición de Coubert en los salones. Sin embargo, a mi entender, no es acertado contemplar el pictorialismo como una ofensa a la esencia de la fotografía. Es cierto que la cámara, como instrumento, está en relación directa con los objetos del mundo, pero cuando se convierte en instrumento de expresión debe gozar de la libertad inherente a todo arte. El universo simbólico que

construye la obra artística, incluida la fotografía, se mide con parámetros distintos a la obra documental. Lo importante y decisivo es qué tipo de idealización de la realidad se pretende y se construye. La idealización que toda expresión artística conlleva camina codo con codo con las relaciones de poder y de producción vigentes en la sociedad en que se producen las obras. La fotografía siempre se debatirá entre ser fiel a su herramienta: la cámara y sus sombras, y negar esto mismo; en esa disyuntiva descansa su ser.

En el siglo XX, volvemos a encontrar esta dualidad entre idealismo y materialismo en el seno de la representación artística y de la ciencia. *El asalto o la destrucción de la razón* que se produce en este siglo, tal como señala Lukács<sup>20</sup>, es un proceso fraguado en la cultura occidental durante años, y que tiene su punto culminante en la cabeza polimorfa del fascismo. Este camino de análisis nos conduce a la obra de Leni Riefenstahl (Figura 7.9), como máximo exponente de una postura estética de lo visual, altamente idealizadora de la realidad, compartida por generaciones de fotógrafos y artistas. En su obra fotográfica y cinematográfica resalta el gusto por los estandartes e insignias, las legiones perfectamente formadas, tanto de militares como fuerzas del orden o de adeptos, los saludos marciales, el primer plano en contrapicado de celebridades y apuestos soldados, o por un expresionismo tétrico y monumental, etc., hasta llegar al ensalzamiento pleno del atleta, de cuerpo

esbelto y fornido como rememoración de la escultura clásica regida por los cánones de la que antes hablábamos. Nada más platónico -en el sentido de volver a encontrar un gusto por los modelos, el orden y el culto a una gran Idea, de pueblo, de raza o de cultura- que esa ampulosidad que encontramos en los decorados de estas celebraciones, en la arquitectura que envuelve el quehacer de los atletas y el vociferio de los próceres, o en esos musculosos cuerpos depilados, o en el despliegue de las masas anónimas que vitorean fanáticamente a sus líderes. La mitificación o estetización de la política que consigue el fascismo, como señala Walter Benjamin, impregna cada rasgo y espíritu de sus obras, ya se trate de uniformes de toda índole, arquitectura, semblantes y poses en los discursos, banderas, saludos o, por supuesto, fotografías fijas o en movimiento como las que



*Figura 7.8. Daumier, por*  
*Nadar 1856- 58.*



*Figura 7.9. Olimpiada, Leni Riefenstahl. 1938.*

produjo esta artista. El patrón estético elegido por Riefenstahl, en estrecha colaboración con el propio Führer, no podía ser otro que esta vuelta a los cánones clásicos, griegos y romanos. Qué lejos esto último de la sinceridad de los retratos de August Sander, perseguido y denostado por ese mismo régimen (Figura 7.10). La línea de continuidad la podemos seguir a través de la historia de la expresión artística, partiendo de la Antigüedad hasta llegar a algunos ejemplos del Star System o a los apolíneos modelos de nuestras actuales imágenes publicitarias. Una interpretación interesada y vaga de la *voluntad* -aquel principio metafísico defendido a ultranza por Schopenhauer, como fuerza cósmica que regurgita en nuestras entrañas y que es enunciado como primer impulso de la vida y de lo todo existente, por encima incluso de cualquier representación o imagen del mundo- lo une el nazismo a la proclamación de la superioridad de la lengua

alemana como lengua originaria y a la creencia de ser un pueblo único y un destino. La estética fascista fue imprescindible para arrastrar a tantas masas de tantas naciones en el mundo. Si la cultura occidental cayó de bruces en la locura y la ignominia, haciendo recelar al más optimista de la idea de progreso, fue porque el veneno ya estaba dentro desde hacía décadas, por no decir desde siempre. La alineación de las masas con el fascismo en gran parte del mundo en el periodo de entreguerras no podría ser entendida sin tener en consideración el papel desempeñado por la imagen y el sonido tecnológicos: fotografía, cine, radio y la incipiente televisión.



*Figura 7.10. Perseguida, hacia 1938. August Sander.*

Mientras esto sucedía en el campo de la imagen documental y artística, el valor de las fotografías en ciencia, como hemos visto anteriormente, era cuestionado por las relaciones de indeterminación de Heisenberg<sup>21</sup>. Tras un siglo de fuerte presencia del positivismo y del materialismo en ciencia, respaldados por la capacidad *objetivizadora* de la fotografía, la imagen volvía a ser cuestionada tal como los sentidos lo habían sido a lo largo de la historia por el idealismo. Los conceptos de espacio y tiempo de la ciencia clásica resultaban inadecuados para explicar el nuevo universo descubierto por la fotografía de partículas. Los datos observables no significaban nada fuera de los nuevos modelos interpretativos, donde la contingencia y la probabilidad comenzaban a jugar un papel preferente. El *cuanto de acción* de Planck obligaba a tener presente este nuevo grado de incertidumbre dada la dificultad de conocer la posición de una partícula y su velocidad a un mismo tiempo. Si atendemos a su posición, su duración se nos escapa; y viceversa. Cuando algunos científicos propusieron adecuar la causalidad a representaciones del espacio y el tiempo renovadas, para poder avanzar en la interpretación de los nuevos fenómenos; o cuando cuestionaron si lo indeterminado pertenecía a lo observado como tal o al mismo fenómeno; Heisenberg salió curiosamente en defensa de lo estrictamente percibido como única vía para el avance de la física. Las relaciones formales defendidas por él como base del conocimiento, puras y abstractas en consonancia con el platonismo, no dificultaron esta defensa de los datos sensoriales ante el nuevo callejón sin salida en el que entraba la física teórica del momento.

Tal vez para explicar este comportamiento esquivo, si no contradictorio, nos ayude mirar hacia el escenario social y político de la época. Tras el desenlace de

la guerra, tanto Heisenberg como Riefenstahl tuvieron que justificar sus conductas de apoyo al régimen nacional-socialista durante muchos años, lo que no afectó a su reconocimiento o a su reinserción en el sistema sociopolítico de la posguerra, uno ocupando cargos relevantes en instituciones científicas de carácter público y en la incipiente industria atómica; la otra acaparando la atención de la sociedad durante años y siendo, con una valoración desmesurada de sus méritos<sup>22</sup>, uno de los fotógrafos más comentados y ensalzados por los medios de comunicación. Ninguno de los dos reconoció en vida haber obrado erróneamente, ni mostró un ápice de arrepentimiento; el insigne físico cuántico reculó cuanto pudo para descartar su participación en la construcción de la bomba alemana, contra la evidencia de los archivos históricos, en tanto que la fotógrafa prefirió poner tierra de por medio y marchar a África de nuevo en búsqueda de guerreros y atletas apolíneos en aquellas tierras maltratadas. Las incursiones del físico en el terreno de la crítica musical y del arte no podían ser menos sorprendentes, la traslación de sus convicciones idealistas al análisis de la música contemporánea, concretamente del jazz y probablemente de las primeras formas del rock, no podían ser más acordes con su forma de pensar. La *deformación* que, a su juicio, presentan estas expresiones artísticas, atribuidas por lo demás a una generación *inexperta*, nos recuerdan los enjuiciamientos de ciertas pinturas y esculturas como *arte perverso* y *decadente* por parte de algunos de sus correligionarios de épocas pretéritas. Sus palabras hablan por sí solas.

*Pero junto a esta tendencia individual hacia nuevos horizontes existe otro riesgo, más bien negativo, en el sentido de la vida de la generación joven, que ha sido ampliamente descrito por los psicólogos. Podríamos definirlo como un afán de liberación de toda forma, como una tendencia a “la deformación”. Este rasgo se aprecia perfectamente, por ejemplo, en la música de jazz y en sus diferentes variantes, que tanto gusta a buena parte de nuestra juventud, que incluso llega a aceptarla como una especie de filosofía de la vida. La característica más acusada es la imprecisión de los contornos, tanto en la armonía como en el ritmo. El tono pierde su nitidez y el ritmo se divide en un ritmo fundamental y otro melódico, con lo que se rompe el equilibrio que reinaba en la música precedente anterior. En el canto se sustituye el texto de las canciones por sílabas incoherentes o sonidos destemplados, con lo cual queda liberada también la forma del lenguaje. Pero en todo esto no hay introducción de forma alguna nueva. Estos rasgos de la música de jazz, al decir de los psicólogos, caracterizan el estado de ánimo de la juventud. Todos los sentimientos aparecen con vaguedad, imprecisión e insatisfacción sorprendentes; este desenfoque, que se debe a la falta de experiencia personal de la vida, o lo que es lo mismo, al alejamiento de la realidad, los impulsa y fortalece al mismo tiempo<sup>23</sup>*

No interesan sin embargo aquí sus biografías personales, sino lo que representan en la historia de la ciencia y del arte. Son modelos de actuación y de pensar que compartieron muchos de nuestros antepasados, cegados por el culto a la personalidad y embelesados por una iconografía guerrera y altamente idealizadora de la realidad y de nosotros mismos. Interesa más detenernos a analizar esta doble moral perteneciente a una generación exquisita y culta, que adoraba y tocaba en sus paseos a Haydn, Mozart, Beethoven o Schubert, pero que

a su vez fue capaz de sucumbir ante la ignominia, y de hacer oídos sordos frente a los campos de concentración y los hornos crematorios. El fascismo es el reencuentro pleno de la historia con el platonismo más conservador y recalcitrante. La jerarquía y el orden social en su grado sumo son una reproducción del universo geométrico, puro, perfecto y abstracto de la Idea platónica. El discóbolo ario que retrata Riefenstahl en *Olympia* (Figura 7.11) sintetiza ridícula y sucintamente toda la estética edificada sobre tanto desfile de falanges y legiones, tanto púlpito de granito y tanto micrófono, tanta águila imperial y tanta columna dórica, que no fueron otra cosa que el reflejo vivo de un desprecio patológico por la diversidad, de un sentimiento de repudio y asco por el otro, de un código excluyente tanto en lo ético como en lo estético. Esta megalomanía enfermiza, sin embargo, no podría entenderse sin atender a causas económicas, a la necesidad expansionista en el caso de Alemania y a la reacción del capital ante los movimientos revolucionarios de corte marxista y anarquista bullentes en numerosos países del mundo.



**Figura 7.11.**  
*Olimpiada. Leni Riefenstahl. 1938.*

En el caso de España, también el fascismo se encargó de edificar esta estética grandilocuente siguiendo el modelo alemán e italiano. Y si buscamos dentro de la fotografía nacional una huella de la obra de Riefenstahl, de sus decorados expresionistas, de esa naturaleza embalsamada, o de sus castillos nebulosos y románticos vistos al contraluz, o de esos personajes populares disfrazados con trajes almidonados y típicos de la región, o de esos trabajadores recios y apuestos, que tanto recuerdan a los galanes de nuestros actuales anuncios de perfumes, etc., eso sí, insuflado todo con el sello inconfundible y autóctono del nacional-catolicismo, lo encontramos en la obra de Ortiz Echagüe y más concretamente en sus fotografías de los años que anteceden y siguen a nuestra guerra civil (Figura 7.12).



**Figura 7.12. Remero vasco, 1934. José Ortiz-Echagüe**

Tanto esmero artesanal y tan depurada técnica de efectos pictorialistas para crear un universo de ensueño acorde con los dictados del poder, en las antípodas de lo que el país padecía en ese momento histórico: destierro, pobreza, represión y tortura. Es paradójico, sin embargo, que la afición del poder por la ética y la estética idealistas no se atenga exclusivamente al fascismo; también la izquierda de entonces y el stalinismo en particular acudieron a la mitificación del obrero y del campesinado de acuerdo con ese tipo de cánones. No es de extrañar que algunas de las fotografías de Echagüe, requisadas por las milicias durante la guerra, sirvieran a los anarquistas españoles para el diseño de sus carteles de propaganda política. Por su parte, el realismo socialista implantado de forma oficial en la URSS idealizaba en arte la misma realidad que el propio dictador se encargaba de manipular retocando las fotografías<sup>24</sup>. El enemigo, mientras tanto, respondía a esta estética caduca con la edificación del Star System.

Por continuar con la presentación dual de obras artísticas y fotográficas pertenecientes a estos dos modelos próximos al idealismo y al realismo; y por elegir ejemplos de imágenes en el extremo opuesto de la sublimación de estos autores ligados al fascismo, baste comentar de nuevo la monumental obra de August Sander, *El rostro del tiempo, hombres del siglo XX*, tan repudiada y perseguida por el nazismo; o el espléndido y afortunado legado que dejaron fotógrafos de la talla de Ruth M. Anderson, Frank Capa, Henri Cartier-Bresson, o Inge Morath para la historia de la España del siglo XX. (Figuras 7.13)





**Figura 7.13. Personaje popular. Ruth Matilda Anderson. h. 1925.**

¿Pero qué ha sido de tanta voluntad y de tanta incertidumbre una vez alejados del final de la II Gran Guerra? La ciencia ha seguido avanzando a medida que se han producido nuevas observaciones de fenómenos en la naturaleza. En nuestros días, la más decisiva e influyente sea tal vez la proporcionada por las fotografías de moléculas hechas por Rosalind Franklin mediante la técnica de difracción de rayos X, que dieron lugar a la determinación de la estructura del ADN. Mientras tanto, las bellezas canónicas han persistido, por supuesto, a través de la idealización publicitaria y hollywoodiense. Pero las tremendas *fotografías* dejadas por la fuerza de *Little John* en forma de sombras petrificadas sobre el asfalto de Hiroshima nos han hecho perder gran parte de nuestra ingenuidad e inocencia, al mismo tiempo que han obligado al poder militar y económico en el mundo a establecer una nueva relación con las ciencias y la imagen técnica. La era de la información es, también, la era del secreto. El fin de las ideologías ha coincidido con la incorporación en las ciencias de visiones relativistas y atentas a lo contingente. La doble interpretación del fenómeno de la luz como ondas y partículas a un mismo tiempo nos obliga a aceptar las relaciones de incertidumbre y la complementariedad de hipótesis en la explicación de los fenómenos atómicos. Los modelos abiertos en biología, la teoría de catástrofes, de los fractales, la lógica difusa, etc., son un claro exponente de esta tendencia por incorporar los elementos aleatorios presentes en la naturaleza a nuestras imágenes de la realidad. Algo parecido ocurre en la relatividad, cuando se acepta la diversidad de puntos de observación y de sistemas de referencia. Que, mediante la formulación simbólica o matemática, podamos vencer estas barreras en el entendimiento de los fenómenos y adelantarnos a los acontecimientos, no es justificación para ampararse en postulados de corte platónico o para establecer una excesiva confianza y fe ciega en los modelos matemáticos. Las observaciones, la acción de la naturaleza sobre nuestros sentidos, sigue siendo lo determinante en la dirección que toman las investigaciones. Las *imágenes físicas* o hipótesis científicas son herramientas de una gran utilidad en el desarrollo de las ciencias, y en ellas desempeña un papel decisivo la imaginación; sin embargo, de acuerdo con la opinión de los científicos más experimentales, se formulan siempre, consciente o inconscientemente, a partir de observaciones efectuadas en el pasado y su valor de predicción queda sujeto siempre a la verificación de nuevas observaciones. La fotografía, como es de esperar, ha cumplido y cumple un papel determinante en este proceso.

¿En qué puede ayudarnos todo esto a la hora de interpretar y construir la realidad cada vez más iconográfica que nos rodea? ¿Podría sernos de utilidad este mismo esquema de análisis a la hora de estudiar las actuales interacciones entre imagen tecnológica e imagen mental, o entre imagen analógica e imagen de síntesis? Los actuales programas informáticos de simulación de fenómenos naturales o de fabricación de imágenes sintéticas están llevando la vieja relación teoría-experiencia a una nueva dimensión en la que la imagen mental y la de síntesis se está plasmando en los monitores gracias a la nueva simbiosis de imagen y algoritmos matemáticos. El control de cada una de las unidades que componen las imágenes digitales, por medio de los píxeles, posibilita estas construcciones a medio camino entre lo real y lo imaginario. Todo ello vuelve a situarnos en el eje central de la ancestral polémica entre ser y pensamiento. Es por lo que cada vez se hace más necesaria una filosofía de la imagen tecnológica. En esta nueva coyuntura se vuelve a correr el peligro de anteponer las construcciones mentales a lo real, ya sea en el ámbito del lenguaje, de la formulación lógica, de las matemáticas o, ahora, de la imagen. Si entendemos que la imagen técnica que se produce a diario en nuestro entorno es un reflejo de lo natural, y en nuestro caso

-constructores y consumidores de ella-, un reflejo de las relaciones de producción existentes en las sociedades que formamos, debemos entonces prestar una gran atención a factores hoy tan determinantes como son el nivel universal que éstas han alcanzado, la distribución de la riqueza y de la energía entre las diferentes naciones y pueblos, o la explotación de la naturaleza como elemento determinante en la adquisición y conservación del liderazgo político y económico. De aquí que gran parte de la producción de imagen técnica en el mundo se emplee para justificar estos hechos que, en definitiva, no son otra cosa que el reflejo del grado de violencia y maltrato al que sometemos nuestro entorno natural, incluidos nosotros mismos, y que tienen su origen en unas relaciones desiguales e injustas entre países, pueblos, razas o géneros.

¿Debe estar el verdadero conocimiento ligado a lo ético? La abstracción pura y aislada de los hechos conduce, como en el platonismo, a exclusividades y privilegios. Si existe una proximidad o una conexión entre el idealismo en ciencia y el idealismo en arte habrá que buscarla en esas últimas causas o formas perfectas y ordenadas que esta escuela de pensamiento quiere encontrar en la naturaleza, en ese principio cósmico e intangible denominado unas veces Idea, otras espíritu, otras voluntad, y que subyace en el conjunto de sus obras. Lo contrario a esta dirección sería atender a lo abierto, dinámico y realmente incierto, como es el caso de la fotografía, sujeta irremediabilmente al campo del azar y de la contingencia en la vida. Frente al sistema cerrado y redondo defender la suerte y el libre albedrío; frente a bellezas tiranas, la forma volátil, mestiza y multiforme; frente a lo absoluto como espejo de un orden sobrenatural, lo absoluto sí, pero terrenal, y como base de la inspiración, de lo justo y del equilibrio. La mitificación, en este sentido, es un reducto del fascismo que pervive en nuestra cultura y en nuestras imágenes, imponiendo la selección, el privilegio, el repudio y, en última instancia, la violencia. El absoluto no está construido de triángulos ordenados sino de polígonos maltrechos, mejor la imperfección que el redondo hueco. La verdadera incertidumbre conduce a la libertad, no al orden y a la quimera de los números.

## **7.8. Icónica: hacia una visión integral del fenómeno fotográfico**

Tras este largo periplo a través de la imagen al servicio de la ciencia, podemos iniciar el camino de vuelta hacia el origen de esta investigación: las ciencias de la imagen y de la información donde queda enmarcada esta andadura. Las lecciones aprendidas son muchas y muy útiles para cualquier profesional dedicado a la construcción e interpretación de imágenes. La primera tal vez sea la necesidad de defender un modelo interdisciplinar para el estudio del fenómeno de la imagen tecnológica, entendiendo que la división por parcelas de conocimiento no beneficia a nadie. La imagen se alimenta de diversas fuentes, donde el arte, la ciencia, la técnica y la cultura marchan de la mano. De la especialización acérrima y unilateral no puede surgir una obra de rigor, arriesgada o de compromiso con la historia de la expresión y del conocimiento. La experimentación del fotógrafo artista necesita del apoyo de la técnica, el fotógrafo documental sabe que sus productos se encuentran en la frontera entre ambos territorios, y el científico debe aceptar que el lado objetivo de la imagen es sólo la punta del iceberg de un vasto universo donde participan de lleno la imaginación, la sensación y la fantasía. Las obras de arte y de ciencia pertenecen a la cultura y a la historia humanas, y como tales deben someterse a una visión de conjunto de la realidad y a un sentido universal de su esfuerzo, por muy minúsculo que éste sea.

A lo largo de estas páginas, hemos comprobado reiteradamente que el mundo de la imagen técnica ha sufrido grandes transformaciones desde su creación con la fotografía, y que es imposible hablar hoy día en términos reduccionistas sobre el

fenómeno dado la extensión y versatilidad del mismo. El propio concepto de fotografía se ha visto desbordado por la proliferación de múltiples técnicas que obedecen a procedimientos muy dispares, y cuyos productos, aún siendo igualmente icónicos, tecnológicos y reproducibles, se apartan notablemente del método tradicional de las sales de plata. Burke propone el concepto de Machine vision<sup>54</sup>, apremiado por la necesidad de ofrecer al mundo industrial y tecnológico una visión de conjunto y rigurosa de la prolijidad de técnicas de la imagen cada vez más necesarias y demandadas en esos ámbitos. Recordemos los conceptos de *sonda*, o de *detector*, surgidos en el seno de la experimentación científica para atender realidades que trascienden el universo fotográfico convencional. Entonces, no sería aventurado por mi parte, proponer el término *icónica* como concepto aglutinador y representativo de los estudios de la imagen tecnológica. Icónica representaría a la ciencia de la imagen tecnológica bajo una perspectiva integradora de los múltiples fenómenos, herramientas y productos que construyen el universo de la imagen actual. Pienso que los vocablos existentes de *iconografía* o *iconología* no se prestan a esta versatilidad, ni atienden al lado tecnológico y científico que la nueva realidad demanda. Ambos términos han estado tradicionalmente más próximos a lo que es el análisis y descripción de las obras y estilos artísticos. Por el contrario, *icónica* se expande más allá al fundamentarse en una pirámide de base triangular que daría cabida a los aspectos físicos, semánticos, psico- sociales y culturales de la imagen técnica.

Uno de los triángulos de esta pirámide trataría de los elementos y procesos físicos que contribuyen a la formación de las imágenes. Fundamentalmente, contaríamos aquí con las radiaciones y los materiales sensibles, debidamente integrados por sistemas de captación, procesamiento, almacenamiento y reproducción de las señales relativas a los objetos (cámaras, escáneres, detectores, sondas, etc.). La ciencia y la tecnología serían las máximas responsables del estudio y desarrollo de esta vertiente de la imagen, a través de disciplinas como la óptica, la fotometría y el estudio de la luz y las radiaciones - hoy día englobadas bajo el término fotónica-, la física y química de los materiales fotosensibles ( materiales sintéticos, tintes, sensibilizadores, coloides, sales de plata, sensores de estado sólido, etc.), técnicas de procesamiento, almacenamiento y transmisión de señales (telecomunicaciones e informática fundamentalmente), tecnologías de proyección y copiado de imágenes (monitores, materiales reproductivos, pantallas, impresoras, etc.), etc. El binomio *energía - materia* sintetizaría todos los procesos físicos, intervinientes en este apartado.

En segundo lugar, comprendería el apartado relativo al *significado* de las imágenes. Los signos físicos de los objetos trasladados a la copia cobrarían un doble valor en el plano del sujeto que las utiliza e interpreta: como herramienta hacia el conocimiento de la naturaleza y como vehículo de expresión. En este caso, el binomio quedaría constituido por los conceptos de *huella* y *símbolo*. La ciencia y el arte serían los máximos responsables en estas dos orillas del quehacer humano. Las imágenes cobran sentido y valor en este lado de la pirámide al servir de herramienta para la profundización del saber, y al convertirse en motivo de expresión, reflexión y deleite de los artistas y del público.

Por último, el tercer plano triangular de este modelo quedaría representado por la *significación* de las imágenes técnicas, entendida como la acción del significado en el contexto cultural y psico-social en el que se producen. El *valor* de las imágenes, en el sentido que Saussure otorga al *valor* de la lengua, como apartado de la significación, se entiende en este caso como el sentido que adopta la imagen en el contexto de los procesos mentales (sensación, percepción, ilusión, imaginación, reflexión y razonamientos por representaciones, etc.), de la sociedad (como valor de cambio, herramienta de comunicación, control y poder, al servicio

de la ideología), y de la cultura (significación cultural: religiosa y mítica, como parte del Ello freudiano, como vía terapéutica, etc.).

El aspecto físico de la imagen técnica se ve respaldado en la actualidad por los avances experimentados en la tecnología digital, especialmente por la fijación del píxel, como unidad mínima icónica. Información, logos e imagen adquieren un sentido concreto en este elemento físico, nacido de la electrónica. Su aceptación como unidad operativa en los procesos industriales, en la imagen científica, documental y doméstica, o en los sistemas de información, identificación y de reconocimiento la convierten en una pieza de indudable valía en el paradigma científico y socio- económico de nuestros días.

En cambio, en el plano del significado, encontrar una unidad mínima de uso es una tarea que se complica dada la dificultad de convertir la imagen en un signo o lenguaje perfectamente articulado. Si el fonema se convirtió en la pieza fundamental sobre la que se articuló la ciencia del lenguaje, de la misma forma en que el concepto de átomo posibilitó un periodo nuevo en la física contemporánea, o el de gen abrió las puertas a la estructuración de la biología molecular, ¿habría la posibilidad de formular un elemento básico, físico y conceptual a un mismo tiempo, sobre el que edificar una ciencia de la imagen? ¿Sería posible descomponer la imagen en elementos básicos y diferenciados, si no únicos, como el fotón o el electrón, al menos como letras o signos de un alfabeto? El *cinema* de Pasolini, como unidad articulada en función del objeto representado y del plano fotográfico, o la triple articulación del código iconográfico, propuesta por Umberto Eco, supusieron un primer intento en esta dirección. La diferenciación entre fotografía y cinematografía, o entre imágenes fijas y únicas, y aquellas otras utilizadas de forma secuencial y dirigidas a provocar la ilusión de movimiento es una cuestión fundamental en estas disquisiciones. Las imágenes, como los objetos mismos, son polivalentes, y la sucesión y combinación de ellas abre las puertas a un lenguaje extremadamente complejo que se debate entre la demostración de los hechos y la comunicación de ideas. La búsqueda de una interrelación entre las unidades físicas de la imagen, como el píxel o el grano de plata, con las unidades más conceptuales relativas a su significado, tal vez pueda aportar algunas pistas a estas cuestiones. En este contexto, el método seguido por otras disciplinas, como Saussure en el estudio del lenguaje, por ejemplo, puede ser altamente inspirador. La diferenciación entre el sonido y el pensamiento, entre la imagen acústica y la idea, o entre el habla y la lengua que este lingüista encontró como base del lenguaje, podría ser trasladada al estudio de la imagen técnica. Si la lengua se fundamenta en dos elementos síquicos como son la sensación y el pensamiento, relativos el uno al procesamiento interno de los estímulos acústicos procedentes de las palabras habladas, y el otro a la idea asociada a ese ruido; en el caso de la imagen, contamos con una sensación que procede de un estímulo en este caso visual, y de una idea o pensamiento que asociamos al mismo. La diferencia que salta a la vista entre estas dos parejas de significantes y significados, obedece a los niveles distintos de arbitrariedad que encierran uno y otro sistema. Mientras que la relación del sonido de la palabra, o del fonema, con su idea es arbitraria, en el caso de la imagen es de total correspondencia, pues se parte de una relación de analogía entre la cosa y el signo que la representa.

En este nivel, relativo a las unidades mínimas de la iconografía, tendríamos pues la separación entre la dimensión puramente física de las unidades icónicas, esto es, el juego y distribución de las luces y las sombras, de los colores, de la granularidad de la emulsión, del foco, del contraste, del tamaño del píxel, etc., y el nivel del sentido que cobra esa unidad dentro del sistema, lo que equivaldría en lingüística a la separación existente entre fonética y fonología. También estaría el caso de la escritura, que al contrario de lo que normalmente se piensa, no es la



propia lengua. Es un simple reflejo, espejo o representación de ésta. En este sentido, la fotografía es al objeto lo que la escritura a la lengua.

*Es como si se creyera que, para conocer a alguien, es mejor mirar su fotografía que su cara.*<sup>55</sup>

En el caso de la imagen científica, de una partícula desintegrándose o del vuelo de un colibrí, no se busca tanto la comunicación como la información, puesto que la ciencia dirige sus pasos hacia la búsqueda de conocimiento por encima de la expresión. La arbitrariedad de las imágenes habría que encontrarla en la visión e interpretación que cada época ofrece de ellas, algo que viene condicionado tanto por el modo de mirar como de los aparatos que se utilizan para la captación y reproducción de las imágenes. En este sentido, las imágenes son tan culturales e ideológicas como las palabras.

El nivel de la intencionalidad o de la significación entra en juego en este momento. Las imágenes cobran sentido en el ámbito de las relaciones sociales, de poder y de producción en las que tiene lugar. Los procesos de enajenación que afectan a toda la actividad intelectual y práctica de los seres humanos se materializan asimismo en la producción de imágenes. El espejo de Atenea produce un reflejo de la realidad que puede ayudarnos a afrontar la realidad, tal como nos señala Kracauer, pero dependerá de la deformación y la veracidad a la que estén sometidas para ir a favor o en contra de las estructuras de poder existentes y del progreso. Sabemos de sobra que las imágenes entran a formar parte de la dualidad información- desinformación omnipresente en los procesos sociales actuales. La razón humana, de donde nace el arte y la ciencia, es contradicha constantemente por el irracionalismo en todas sus formas. El interés por defender causas más allá de la razón como origen de las desigualdades o de la violencia humana, es algo que vemos constantemente en el plano de las imágenes. En la actualidad, la mitificación a través de la imagen, ha sido sustituida por un modelo más democrático en el que el héroe puede ser cualquiera, alejado de los cánones apolíneos; sin embargo, el espíritu de la razón y de la verdadera ciencia se contradice con las mismas armas de siempre, con la sinrazón y lo metafísico.

*La defensa actual - directamente apologética- del capitalismo, renuncia aparentemente al mito y al irracionalismo. En cuanto a la forma, al modo de exposición y al estilo, nos encontramos aquí con una línea de argumentación puramente conceptual y científica. Pero sólo aparentemente. El contenido de la construcción conceptual es, en realidad, la pura ausencia de conceptos, la construcción de concatenaciones inexistentes y la negación de las leyes reales, el aferramiento a las concatenaciones aparentes reveladas directamente (es decir, al margen de los conceptos) por la superficie inmediata de la realidad económica. Estamos, por tanto, ante una nueva forma de irracionalismo, envuelto bajo un ropaje aparentemente racional.*<sup>56</sup>

La ciencia y sus imágenes deben ser contempladas desde una perspectiva histórica y universal, pues sus productos no están desligados de la práctica social. El conocimiento humano reclama una visión global de la actividad científica y artística, de la acción humana sobre la naturaleza en el contexto de un mundo cada vez más interdependiente e internacionalizado. El conocimiento se construye en el seno de estas relaciones sociales, por lo que su avance depende del progreso en

el lado humano. La transformación de la realidad bajo los supuestos de la razón es un proceso repleto de contrariedades. Las imágenes están ahí para comprenderlo y atestiguarlo.

## Notas del capítulo 7

- 1 Benjamin, Walter. *Pequeña historia de la fotografía*. Pre- Textos 2004. p 28.
- 2 Op cit. Kracauer, S. p 373.
- 3 Alberti, Leon Battista. *Tratado de la pintura*. Edición conjunta. Murcia 1985. Libro segundo. p 227. "Della Pintura" (1436).
- 4 Popper, Karl. *La lógica de la investigación científica*. Tecnos, 1967. ["The Logic of Scientific Discovery". Hutchinson & Co Ltd, Londres] p 260.
- 5 Platón. *Diálogos*. Fedón. Bruguera 1982. p159
- 6 El término analógico se refiere, en este contexto, a la relación directa, de semejanza, que tiene la imagen creada respecto del objeto real que representa; a diferencia de su significado específico en el ámbito del procesamiento de las señales electrónicas.
- 7 Brillouin, Leon. *Science and Information Theory*. Academic Press, 1960. p ix.
- 8 Una copia íntegra de este discurso está recogida en Op. cit. Eder. History of... p 233.
- 9 Eco. U. *Acerca de las articulaciones del código cinematográfico*. En Comunicación 1. Ideología y lenguaje cinematográfico. Ed. Alberto Corazón. 1969. p 137 y ss.
- 10 Metz, C. *Lenguaje y cine*. Ed. Planeta. 1973. Langage et cinéma. Librairie Larousse. 1973. p 60 y 65.
- 11 Saussure, Ferdinand de. *Curso de lingüística general*. Losada, 1970. p 108.
- 12 Ibid. p 91- 92.
- 13 Ibid. p 59.
- 14 Pasolini, P. P. *La lengua escrita de la acción*. En Op. cit. ideología y .... p 24-5.
- 15 Barthes, R. *Elementos de semiología*. Comunicación. Serie B. Ed. Alberto Corazón. 1971. p 93.
- 16 Ortega y Gasset, José. *Vicisitudes en las ciencias*. El Sol, 9 de marzo de 1930. En Meditación de la técnica y otros ensayos sobre ciencia y filosofía. Revista de Occidente en Alianza Editorial, 1995. p 139.
- 17 *Verachte nur Vernunft und Wissenschaft,/ Des Menschen allerhöchste Kraft.../ So hab ich dish schon unbedingt*. Fausto de Goethe, versos 1851-5. Trad. Wensceslao Roces, en *El Asalto a la razón*, de Georg Lukács. Ed. Grijalbo, 1972. p 74.
- 18 Tal como he señalado anteriormente, otra función de la imagen, nada desdeñable, es su utilización como elemento terapéutico, o para la relajación y la meditación como es el caso de los mandalas.
- 19 Op. cit. Heisenberg. La parte y el todo. p 106.
- 20 Op. cit. Lukács.
- 21 Ver cita previa de Heisenberg, Werner. *Marchando hacia un nuevo mundo*. (1926- 27) Artículo recogido en La parte y el todo. Conversando en torno a la física atómica. Ellago ediciones, 2004. Título original: Der teil und ganze. p 106.
- 22 Los elementos, tanto estéticos como narrativos, de sus obras están ya presentes en el constructivismo y en el cine rusos de la década anterior.
- 23 Heisenberg, Werner. *La tendencia a la abstracción en el arte y la ciencia modernos*. Conferencia pronunciada en la Fundación Karajan, en Salzburgo,

1969. En *Más allá de la física*. Biblioteca de autores cristianos, de La Editorial Católica, S. A. 1974. Título original: Schritte über Grenzen. R. Riper & Co. Verlag. 1971. p 216.
- 24 Es importante señalar como este dogmatismo en lo estético tuvo su correlato en el ámbito de la ciencia en su empeño por descartar toda teoría o aproximación científica que no estuviera regida rigurosamente por el método dialéctico o por una estricta causalidad experimental. Sirva de ejemplo la actitud tomada por la oficialidad científica de corte stalinista ante teorías como el psicoanálisis, denostada por burguesa, y en favor de aquellas otras más próximas al pavlovismo o al behaviorismo. Es evidente que el comunismo en el poder pronto se olvidó de la máxima de Epicuro contra el determinismo a ultranza, actitud ampliamente defendida por el joven Marx en su tesis doctoral de 1841.
- 25 de Goya, Francisco. *Los caprichos*. 1796- 9.
- 26 Sartre, Jean Paul. *La Imaginación*. Edhasa 1980. L'Imagination. p 67.
- 27 Aristóteles. *Acerca del alma*. 431 a15, (A18). p 239. Gredos, 1978.
- 28 Ibid. 431, b15 (A20), p 240.
- 29 Ibid. 432, a5, p 241.
- 30 Ibid, p 242.
- 31 Epicuro. *Carta a Heredoto*. [40], En Epicuro, Obras. Altaya 1998. p 17.
- 32 Piaget, J. *La epistemología genética*. Colección Beta, 1970. p 30.
- 33 Ibid. p 59.
- 34 García, R. *Dialéctica, psicogénesis e historia de las ciencias*. Prólogo a Piaget, J. Las formas elementales de la dialéctica. Gedisa, 1982. p 209-10.
- 35 Benjamin, Walter. *La obra de arte en la época de su reproductibilidad técnica*. Incluido en Sobre la fotografía, recopilación de textos del filósofo alemán en Pre-Textos. 2004. p 64. [Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. 1939.]
- 36 Jung, Carl, G. *Acercamiento al inconsciente*. En El hombre y sus símbolos. Paidós 1995, p 38.
- 37 Franz, Marie- Louise von. *La ciencia y el inconsciente*. En El hombre y sus símbolos. Paidós, 1995, p 308- 9.
- 38 Cuevas José. *Fotografía y conocimiento. La fotografía en la era electrónica. (Desde los inicios hasta 1975)*. Editorial Complutense. 2007. p 205.
- 39 Planck, M. *Autobiografía científica. Sentidos y límites de la ciencia exacta*. Sinn und Grezen der exakten Wissenschaft. Conferencia impartida en 1941. 6ª edición alemana 1958. Nivola 2000. p 80.
- 40 Op. cit. Cuevas. Cap. 8.
- 41 Boltzmann, Ludwig. *On the significance of Theories*. Populäre Schriften, Essay 5. In reply at a farewell ceremony, July 16, 1890. En Theoretical Physics and Philosophical Problems: Selected Writings. D. Reidel Publishing Company, 1974. p 33. (Traducción propia)
- 42 Ibid, p 36. (Traducción propia)
- 43 Farrington, Benjamin. *Science and the Classics*. Nature, 30 de septiembre de 1961. p 1339. (Traducción propia)
- 44 Steiner, George. *Mathematical Literacy for the Non- mathematician*. Nature. Vol. 243, 11 de mayo de 1973. p 65 y ss. (Traducción propia)
- 45 Jeans, James. *Nuevos fundamentos de la ciencia*. Espasa Calpe, 1936. p 56.
- 46 Karl Marx- Friedrich Engels. *La Ideología Alemana*. Obra concebida entre



- 1844 y 1845. Ediciones Grijalbo 1974. p 26
- 47 Mach, E. *Análisis de las sensaciones*. Alta Fulla. 1987. p 110.
- 48 Lenin. V. I. *Materialismo y empiriocriticismo*. Ayuso. 1974.
- 49 Op. cit. Mach. *Análisis...* p 216 y 292.
- 50 Omelyanovsky, M. E. *Dialectics in Modern Physics*. Progress Publishers, 1979.
- 51 Op. cit. Piaget. *Epistemología...* p 116.
- 52 Nelson, C. N. *The Theory of Tone Reproduction*. En Mees, C. E. Keneth. *The Theory of the Photographic Process*. MacMillan 1966. p 464.
- 53 Lukács, Georg. *El Asalto a la razón*. Ed. Grijalbo, 1972. p 79.
- 54 Op. cit Burke.
- 55 Op. cit. Saussure, p 72.
- 56 Op. cit. Lukacs. p 628.

# Bibliografía

## MONOGRAFÍAS

Aballe, M. López Ruiz, J., Badía, J. M. y Adeva, P. (Coordinadores). Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X. CSIC y Ed. Rueda. 1996.

Abbott, Berenice. Aperture Masters of Photography. Aperture, 1988.

Adams, Anselm. The Negative. Little, Brown and Company, 1989.

Alberti, Leon Battista. Tratado de la pintura. Edición conjunta. Murcia 1985. Libro segundo. "Della Pintura" (1436).

Allen, H. S. The Early History of Photo- Electric and Selenium Cells. en Photo- Electric Cells and their Applications. Anderson, John, S. Editor. The Physical and Optical Societies, 1930.

Anderson, John, S. Photo- Electric Cells and their Applications. The Physical and Optical Societies. 1930.

Aristóteles. Acerca del alma. Gredos 1978.

Baines, H. The Science of Photography. Fountain Press, 1970.

Barer, R. Phase- Contrast and Interference Microscopy. En Progress in Photography.

Barthes, R. Elementos de semiología. Comunicación. Serie B. Ed. Alberto Corazón. 1971.

Bender, L. A Visual Motor Gestalt Test and its Clinical Use. The American Orthopsychiatric Association, 1938.

Benford, J. R. Ultra- violet Photomicrography and Metallography. En Progress in Photography.

Benjamin, Walter. La obra de arte en la época d su reproductibilidad técnica. Incluido en Sobre la fotografía, recopilación de textos del filósofo alemán en Pre- Textos. 2004. [Das Kunstwerk im Zeitalter seiner technischen Reproduzierbarkeit. 1939].

Benjamin, Walter. Pequeña historia de la fotografía. En Sobre la fotografía. Pre-Textos. 2004.

Bernabé, Alberto. De Tales a Demócrito. Fragmentos Presocráticos. Ed: Bernabé, Alberto. Círculo de Lectores, 1995.

Blaker, A, A. Handbook for Scientific Photography. Focal Press, 1989.

Bohr, Niels. Conferencia en memoria de Rutherford. 1958. Versión de 1961 de la conferencia impartida en la Physical Society de Londres. En Física atómica y conocimiento humano. Aguilar 1970.

Boltzmann, Ludwig. On the significance of Theories. Populäre Schriften, Essay 5. In reply at a farewell ceremony, July 16, 1890. En Theoretical Physics and Philosophical Problems: Selected Writings. D. Reidel Publishing Company, 1974.

Brillouin, Leon. Science and Information Theory. Academic Press, 1960.

Brinckman, E. Delzenne, G. Poot, A. Willems J. Unconventional Imaging Processes. The Focal Press, 1978.

Broda, E; y Schönfeld. W. The Technical Applications of Radioactivity. Pergamos Press, 1966.

Broglie, Louis de. Teorías abstractas y representaciones concretas en la física moderna. En Continuidad y discontinuidad en la física moderna. [Continu et discontinu en Physique Moderne]. Espasa Calpe, 1957.

Broglie, Louis. Continuidad e individualidad en la física moderna. En Materia y luz. Espasa Calpe. 1939.

Broglie, Louis. Por los senderos de la ciencia. Espasa Calpe, 1963. [Sur les sentiers de la Science. Editions Albin Michel, 1960].

Brooker, L. G. S. Sensitizing and Desensitizing Dyes. En Mees, C. E. Keneth. The Theory of the Photographic Process. MacMillan 1966.

Burke, Michael W. Image Acquisition. Chapman Hall. 1996. p 541.

Clark, W. Photography by infrared. Its principles and Applications. John Wiley & sons, 1946.

Cuevas, José. Fotografía y conocimiento: la fotografía en la ciencia hasta 1927. Sin publicar. UCM, 2003.

Curtis, A. S. G. Quantitative Photomicrography. En Engel, C. E. Photography for the Scientist. Academic Press. 1968.

Derrida, Jacques. La desconstrucción en las fronteras de la filosofía. Paidós. ICE. UAB. 1989. [Título original: Le retrait de la métaphore y Envoi, en Pyché. Ed: Galiléé, París. 1987.

Déribéré, M. Porchez, J. y Tendron, G. La fotografía científica. Ediciones Omega. (sin fecha) [La Photographie Scientifique.]

Eco. U. Acerca de las articulaciones del código cinematográfico. En Comunicación 1. Ideología y lenguaje cinematográfico. Ed. Alberto Corazón. 1969.

Eddy, C. G. Endoscopic Photography. En Progress in Photography.

Eder. J. M. History of Photography. Dover, 1953

Eder, Josef Maria. La Photographie Instantanée, son application aux arts et aux sciences. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.

Epicuro. Carta a Heredoto. En Epicuro, Obras. Altaya 1998.

Fleischer, R. L; Price, P. B; y Walker, R. M. Nuclear Tracks in Solids. Univ. of California Press. 1975.

Flichy, Patrice. Una historia de la comunicación moderna. Espacio público y vida privada. Gustavo Gili, 1993. [Une historie de la communication moderne. Espace public et vie privée. Editions La Decouverte, París, 1991.]

Flusser, Vilém. Una filosofía de la fotografía. Síntesis, 2001. [“Für eine Philosophie der Fotografie”. European Photography]

Fowler, P. H; y Perkins, D. H. Application of the Photographic Plate to the Investigation of Problems in Nuclear Physics and Cosmic Rays. En Fundamental Mechanism of Photographic Sensitivity. Butterwoths Sci. Publications. 1951.

Franz, Marie- Louise von. La ciencia y el inconsciente. En El hombre y sus símbolos. Paidós, 1995.

Früngel, F. B. A. High Pulse Technology. Academic Press. 1965 y 1972. Vol I, II y III.

Galadí- Enríquez, D, y Ribas, I. Manual práctico de Astronomía CCD. Ediciones Omega, 1998.

Galison, Peter. Image and Logic. A Material Culture of Microphysics. The University of Chicago Press. 1997.

García, R. Dialéctica, psicogénesis e historia de las ciencias. En Piaget, J. Las formas elementales de la dialéctica. Gedisa, 1982.

Gates, J. W. C. Holographic Methods of Visualization and Measurements in Engineering. The Journal of Photographic Science, Vol. 19, 1971.

George, L. A.; y Vogt, G. S. Electron Microscopy of Autoradiographed Radioactive Particles. Nature. 7 de noviembre de 1959.

Gubern, Román. En Pérez Ornia J. R. El arte del vídeo. Ed: Serbal- RTVE, 1991.

Haas, A, y Hallows, R. W. The Oscilloscope at Work. Iliffe and sons. 1954.

Hansell, Peter. Ultraviolet and Fluorescence Recording. En Engel, Charles E. Photography for the Scientist. Academic Press. 1968.

Hauser, Arnold. The Social History of Art. Vintage Books Ed 1985.

Hawking, Stephen W. Historia del tiempo. Del Big Bang a los agujeros negros. Círculo de lectores. 1988. [Título original: A Brief History of Time. From the Big Bang to Black Holes].

Heidegger, Martin. El ser y el tiempo. FCE. 1989. [Título original: Sein und zeit. Max Niemeyer Verlag. 1927.

Heisenberg, Werner. La tendencia a la abstracción en el arte y la ciencia modernos. Conferencia pronunciada en la Fundación Karajan, en Salzburgo, 1969. En Más allá de la física. Biblioteca de autores cristianos, de La Editorial Católica, S. A. 1974. [Título original: Schritte über Grenzen. R. Riper & Co. Verlag. 1971.]

Heisenberg, Werner. Marchando hacia un nuevo mundo. (1926- 27) Artículo recogido en La parte y el todo. Conversando en torno a la física atómica. Ellago ediciones, 2004. [Título original: Der teil und ganze.]

Herz, R. H. Auto- Radiography. En Progress in Photography.

Hoadley, H. W. Scientific Applications of Photography. En Neblette's Handbook of Photography and Reprography. Materials, Processes and Systems. Ed. John M. Sturge. Van Nostrand Reinhold Company, 1977.

Homero, La Iliada. Gredos 1996.

Howell, S. B. Handbook of CCD Astronomy. Cambridge Univ. Press. 2000.

Ilford. Photography as an aid to Scientific Work. An Ilford Textbook. Ilford, 1950.

Ivins jr, W. M. Imagen impresa y conocimiento. Análisis de la imagen prefotográfica. Gustavo Gili, 1975. [Título original. Prints and Visual Communication. Roulledge & Kegan Paul, Ltd.]

Jeans, James. Historia de la física. Fondo de Cultura económica 1953. [Título original: The Growth of Physical Science. The Macmillan Company.]

Jeans, James. Nuevos fundamentos de la ciencia. Espasa Calpe, 1936.

Jung, Carl, G. Acercamiento al inconsciente. En El hombre y sus símbolos. Paidós 1995.

Kirk, G. S. y Raven, J. E. The Presocratic Philosophers. Cambridge University Press, 1962.

Klosevych, S. Principles and Practice of Microscopy and Scientific Photography. Microscopical Society of Canada, 1989.

Klüber, H von. Photographic Photometry. En En Progress in Photography 1951-1954. Focal Press.

Klug, A. Rosalind Franklin and the Discovery of the Structure of ADN. Nature. 24 de agosto de 1968.



Koehler, R. Les Applications de la photographie aux sciences naturelles. París. Gauthier Villars et fils. G. Masson, 1892.

Kohler, W. Psicología de la forma. Paidós. 1953.

Kosar, Jaromir. Light- Sensitive Systems: Chemistry and Application of Nonsilver Halide Photographic Processes. John Wiley & sons, 1965.

Kracauer, S. Teoría del cine. Paidós. 1996. [Theory of film. The Redemption of Physical Reality. Oxford Univ. Press. 1960]

Kuhn, Thomas S. La estructura de las revoluciones científicas. Fondo de Cultura Económica, 1981. The Structure of Scientific Revolutions. University of Chicago Press, 1962.

Langevin, Paul. El espíritu de la enseñanza científica. En Introducción a la relatividad. 1947. Siglo XX. Bueno Aires. [La Physique depuis vingt ans.]

Langevin, Paul. Introducción a la relatividad. 1947. Siglo XX. Bueno Aires. [La Physique depuis vingt ans.]

Lavenir, Catherine B. Great Discoveries. Telecommunications. UIT, 1991.

Laws, F. C. V. Aeronautical Photography. En Op. cit. Photography as a Scientific Implement.

Lehmbeck, D. R. Electrophotographic Processes and Systems. En Neblette's Handbook.

Lipfert, Kurt. La televisión. Espasa Calpe, 1940.

Lou Gibson, H. Infra- Red Recording. En Engel, Charles E. Photography for the Scientist. Academic Press. 1968.

Lucrecio. De la naturaleza de las cosas. Cátedra. 1994.

Lukács, Georg. El Asalto a la razón. Ed. Grijalbo, 1972.

Mach, E. Análisis de las sensaciones. Alta Fulla. 1987.

Mach, E. Conocimiento y error. Espasa Calpe Argentina, 1948.

Maddox, B. Rosalind Franklin. The Dark Lady of DNA. HarperCollins Pub. 2002.

Marx, Karl. Diferencia de la filosofía de la naturaleza en Demócrito y en Epicuro. Ayuso, 1971.

Marx. K; y Engels, F. La Ideología Alemana. Ediciones Grijalbo 1974.

Meadows, Dennis L, y otros autores. The Limits of Growth. A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. Potomac Associates Book, 1974.

Mees, C. E. Keneth. The Theory of the Photographic Process. MacMillan 1966.

Menéndez- Pidal, Gonzalo. La España del siglo XIX, vista por sus contemporáneos. Ed. Centro de Estudio Constitucionales. 1988. Tomo I y II.

Metz, C. Lenguaje y cine. Ed. Planeta. 1973. [Langage et cinéma. Librairie Larousse. 1973.]

Millikan, Roberto Andrés. Electrones (+ y -), protones, fotones, neutrones y rayos cósmicos. University of Chicago Scientific Series. Espasa Calpe Argentina 1944.

Mitry, J. Estética y psicología del cine. Siglo XXI. Vol. I y II.

Moholi-Nagy, L. Del pigmento a la luz (1936) En Estética fotográfica. Ed. Joan Fontcuberta. Gustavo Gili 2003.

Moholi-Nagy, L. La Nueva Visión. Buenos Aires, Ed. Infinito, 1985. ["Von Material zur Architektur", 1929]

- Monod, J. El azar y la necesidad. Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna. Barral Ed. 1971. [Le hasard et la nécessité. Ed. du Seuil, 1970.]
- Mumford, Lewis. Técnica y civilización. Altaya, S. A., 1998. [“Technics and Civilization”. Harcourt, Brace & World, Inc., 1963].
- Murray, Richard D. Silverless Imaging Systems. En Neblette’s Handbook.
- Neblette, C. B. La fotografía, sus materiales y procedimientos. Ediciones Omega. 1960.
- Needham, Joseph. La ciencia y la influencia china en el mundo. En “El legado de China”, colección de artículos dirigida por Raymond Dawson. Pegaso, 1964.
- Nelson, C. N. The Theory of Tone Reproduction. En Mees, C. E. Keneth. The Theory of the Photographic Process. MacMillan 1966.
- Newhall, B. The History of Photography. MOMA, 1964.
- Nicoll, J. Wilhelm Conrad Röntgen y la era de los rayos X. Ediciones Cid 1966.
- Omelyanovsky, M. E. Dialectics in Modern Physics. Progress Publishers, 1979.
- Ortega y Gasset, José. Vicisitudes en las ciencias. El Sol, 9 de marzo de 1930. En Meditación de la técnica y otros ensayos sobre ciencia y filosofía. Revista de Occidente en Alianza Editorial, 1995.
- Pasolini, P. P. La lengua escrita de la acción. En Ideología y lenguaje cinematográfico. Comunicación 1.
- Pasolini, P. P. Cine de poesía. En Pier Paolo Pasolini contra Eric Rohmer. Cine de poesía contra cine de prosa. Anagrama 1976.
- Peirce, Charles Sanders, Treatise on Metaphysics, 1861-2. En Collected Writings. Indiana Univ. Press. 1993. p 62. (Traducción propia).
- Piaget, J. La epistemología genética. Colección Beta, 1970.
- Pickworth Glusker, J, y Trueblood, K. N. Crystal Structure Analysis, A Primer. Oxford Univ. Press. 1985.
- Pierce, John R, y Noll, A Michael. Señales. La ciencia de las telecomunicaciones. Ed. Reverté, 1995. [Título original: Signals. The Science of Telecommunications. Scientific American Library.]
- Planck, M. Autobiografía científica. Sentidos y límites de la ciencia exacta. Nivola 2000. [Sinn und Grezen der exakten Wissenschaft. Conferencia impartida en 1941. 6ª edición alemana 1958].
- Planck, Max. Termodinámica. Del prólogo a la segunda edición, 1905. Calpe 1947.
- Platón. Diálogos. Fedón. Bruguera 1982.
- Popper, Karl. La lógica de la investigación científica. Tecnos, 1967. [“The Logic of Scientific Discovery”. Hutchinson & Co Ltd, Londres]
- Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. Nuclear Physics in Photographs. Clarendon Press, 1947.
- Reid, Robert. Marie Curie. Salvat Editores, 1985. [“Marie Curie”, Camair Press]
- Rodman, G. H. Photomicrography. En Op. cit. Implement.
- Rogers, A. W. Techniques of Autoradiography. Elsevier Publishing Company, 1969.
- Rutherford, Ernest. Radioactive Transformations. Oxford Univ. Press, 1911.
- Sánchez Ron, José M. Marie Curie y su tiempo. ABC, 2000.
- Santini E- N. Mendel CH. Ed . La Photographie a travers des corps opaques. París, 1896.

- Sartre, Jean Paul. La Imaginación. Edhasa 1980. [L'Imagination].
- Saussure, Ferdinand de. Curso de lingüística general. Losada, 1970.
- Schackel, B, y Watson, G. R. Closed- Circuit Televisión. En C. E. Engel. Photography for the Scientist. Academic Press. 1968.
- Schade, O. H. Image quality. A Comparison of Photographic and Television Systems. Princeton, NJ. RCA Laboratories. 1975.
- Schrödinger E. ¿Qué es la vida? El aspecto físico de la célula viva. Tusquets. 1988. [What is Life? The Physical Aspect of the living Cell. Cambridge Univ Press 1944.]
- Shaftan, K. High Speed Photography. En Op. cit. Progress....
- Sheppard, S. E. The Theory of Photographic Processes and Methods. En Photography as Scientific Implement. A Collective Work. Blackie and Son Limited, 1923.
- Sougez. Marie- Loup. Historia de la fotografía. Cátedra 1991.
- Spence, J. The Action of Nuclear Particles on the Photographic Emulsions. En Mees, C. E. Keneth. The Theory of the Photographic Process. MacMillan 1966.
- Stanley Allen, H. Photo- Electricity. The Liberation of Electrons by Light. Longmans, Green and Co, 1913.
- Steinert, Otto. Sobre la las posibilidades de creación en fotografía. Op. cit. Fontcuberta.
- Thomas, Ann. Beauty of Another Order. Photography in Science. Yale University Press, National Gallery of Canada, 1997.
- Tolansky, S. Surface Microphotography. Longsman, 1960.
- Trouvelet, E. T. Sur la forme de décharges electriques sur les plaques photographics. La Lumiere Eléctrique, 1888, v 30.
- UIT. Del semáforo al satélite. Compilación de la UIT, 1965.
- VV. AA. The Focal Encyclopedia of Photography. McGraw Hill, 1976.
- VV.AA. Focal Encyclopedia of Photography. MacGraw Hill. Focal Press Ltd. 1969.
- VV.AA. Neblette's Handbook of Photography and Reprography. Materials, Processes and Systems. Ed. John M. Sturge. Van Nostrand Rinhold Company, 1977
- VV.AA. The Effects of Atomic Weapons. Los Alamos Scientific Labs. 1950.
- Walsh, John W. T. Photometry. Dover Publications, 1953.
- Watson, J. D, y Crick, F. H. C. Molecular Structure of Nucleic Acid. Nature. 25 de abril de 1953.
- Weinberg, Steven. The Discovery of Subatomic Particles. Cambridge Univ. Press. 2003.
- Westfall, Richard, S. Isaac Newton: una vida. Ed: Folio 2004. p 40. [Título original: The Life of Isaac Newton. Cambridge Univ. Press. 1996].
- Zischka, Anton. La epopeya de la electricidad. De la pila de Volta al ciclotrón. Círculo de lectores, 1967. [Título original: Pioniere der Elektrizität. C. Bertelsman Verlag, 1958.]
- Zworykin V. K.y Morton G. A. Television. The Electronics of Image Transmission. Wiley 1946.
- Zworykin, V. K, Ramberg, E. G. Photoelectricity and its Application. John Wiley and Sons, 1949.
- Zworykin, V. K., Morton, G. A., Ramberg, E. G., Hillier, J., Vance, A. W. Electron Optics and the Electron Microscope. John Wiley and Sons. 1946.

## ARTICULOS PUBLICADOS EN REVISTAS

Allen, H. M. Detection of Inhomogeneities in Transparent Plastic Sheet by a Simple Schlieren Technique. *Nature*. 6 de julio de 1957.

Allen, N. L. y otros. The Associated Electrical Industries Levitron. *Nature*. 13 de julio de 1963.

Allen, N. L.; y otros. A Stabilized High-Current Toroidal Discharge Producing High Temperatures. *Nature*. 25 de enero de 1958.

Allen, T. K.; y Bickerton, R. J. Experiments on the Compression of Plasma in Cusp Geometry. *Nature*. 19 de agosto de 1961.

Allibone, T. E. Development of the Spark Discharge. *Nature*. 19 de julio de 1948.

Andrade, E. N. da C. A century of Physics. Physics from 1850 to 1900. *Nature*, 13 de octubre de 1951.

Andrade, E. N. da C. Phenomena in a Sounding Tube. *Nature*. 21 de marzo de 1931.

Andrade, E. N. da C. The History of the Vacuum Pump. *Adv. Vac. Sci. Tech.* 1, 14-20. 1960.

Anger, H. O. Use of a Gamma-Ray Pinhole Camera for in vivo Studies. *Nature*. 2 de agosto de 1952.

Aniansson G.; y Steiger, N. Microradiography with Alpha-Rays. *Nature*. 2 de agosto de 1952.

Bates, W. J.; y Occhialini, G. P. S. Applications of the Reflecting Microscope to the Nuclear Plates Technique. *Nature*. 27 de marzo de 1948.

Beeson, E. J. G. A High-Intensity Light Source for High Speed Cinematography. *Nature*. 10 de septiembre de 1949.

Astbury, W. T.; y Bell, F. O. X-Ray Study of Thymonucleic Acid. *Nature*. 23 de abril de 1938.

Astronomy Correspondent. *Nature*. Album of the Moon. 4 de enero de 1969.

Astronomy Correspondent. *Nature*. First Look at the Apollo 8 Pictures. 18 de enero de 1969.

Atkinson, D.; Lewis, J. K. Time-Lapse Cinematographic Studies of Fruit Tree Root Growth. *The Journal of Photographic Science*. Vol. 27, 1979.

Audus, L. J. Magnetotropism: a New Plan-Growth Response. *Nature*. 16 de enero de 1960.

Aznárez, J. A. Breakdown of Sodium Thiosulfate in Evaporated Silver Bromide Layers, Studied by Electron Microscopy. *Photographic Science and Engineering*. Vol. 25, 6 de noviembre de 1981.

Aznárez, J. A. Breakdown of Sodium Thiosulfate on Silver Halide Grains, Studied by Electron Microscopy. *Journal of Photographic Science* Vol. 25, Nº 2, 1977.

Aznárez, J. A.; Catalina F. Imagen latente superficial en haluros de plata. *Optica pura y aplicada*. Vol. 3. 1970. Num. 3.

Baker, E. A. y Smyth, M. J. Recent Advances in the Application of Photography to Astronomy. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 3, 1955.

Barer, R. Ultra-Violet Television Microscopy. *Nature*. 16 de diciembre de 1961.

Barnard, J. E. Microscopy with Ultra-violet Light. *Nature*, 18 de noviembre de 1920.

Bastin, J. A. Small Scale Lunar Roughness. *Nature*; 8 de octubre de 1966.



Bates, B; Bradley, D. J; McKeith, C. D; y McKeith, N. E. Fabry- Perot Interferograms of the Solar Mg II Doublet and XUV Solar Images Obtained during Stabilized Skylark Rocket Flight. *Nature*. 11 de octubre de 1969.

Bernal, J. D. A Geometrical Approach to the Structure of Liquids. *Nature*. 17 de enero de 1959.

Berriman, R. W. Electron Tracks in Photographic Emulsions. *Nature*. 20 de marzo de 1948.

Binning, G; Fuschs, H; y Stoll, E. Surface Diffusion of Oxygen Atoms Individually Observed by STM. *Surface Science* Enero de 1986.

Black, W. S; Booker, D; Burton, W. M; Jones, B. B; Shenton, D. B; y Wilson, R. Solar Spectroscopy in the Extreme Ultra- Violet Using Stabilized Skylark Rockets. *Nature*. 15 de mayo de 1965.

Blackwell, D. E; Dewhirst, D. W; y Dollfus, A. Solar Granulation and its Observation from a Free Balloon. *Nature*. 3 de agosto de 1957.

Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum, S. A Semi- Automatic Device for Analyzing Events in Nuclear Emulsions. *The Review of Scientific Instruments*. Vol. 21. N. 12. Diciembre de 1950.

Bleany, B. Spectroscopy at Radio- Frequencies. *Nature*. 27 de enero de 1951.

Bliss, J. L. Photographic Recording of Television Images: A Review of Progress. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 2. 1954.

Born, Max, Fürth, R, y Pringle, R. W. A Photo- Electric Fourier Transformer. *Nature*, 22 de diciembre de 1945.

Bosley, W. Craggs, J. D. y Nash, W. F. Some experiments with Fast Electrons and Positrons Produced by a 20-MeV. Betatron. *Nature*. 6 de diciembre de 1947.

Bowden, F. P; y Chadderton, L. T. Molecular Disarray in a Crystal Lattice Produced by a Fission Fragment. *Nature*. 7 de octubre de 1961.

Boyd, R. L. F. Celestial Laboratories. *Nature*. 6 de abril de 1963.

Boyd, R. L. F; Groves, G. V, y Bowen, P. J. Photography and Rockets. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 8, 1960.

Boyle, W. S. y Smith, G. E. Charged Coupled Semiconductors Devices. *The Bell System Technical Journal*. Abril de 1970.

Boyne, P. J. y Whittemore, W. L. Neutron Radiography of Osseous Tumours. *Nature*. 16 de abril de 1971.

Boys, C. V. Drops and Splashes. *Nature*, October 29, 1908.

Bradbury, S. Microscopy To-Day. *Nature*. 19 de abril de 1958.

Bragg, L. X-Ray Studies of Biological Molecules. *Nature*. 10 de julio de 1954.

Bragg, W. Crystals of the Living Body. *Nature*. 1 y 8 de julio de 1933.

Brillouin, Leon. Information Theory and its Applications to Fundamental Problems in Physics. *Nature*. February 21, 1959.

Broadbente, T. E. Path of the Trigatron Spark. *Nature*. 20 de octubre de 1956.

Brown J. On figures produced by Electric Action on Photographic Dry Plates. *Phil. Mag.* 1888. serie 5, vol. 26.

Brown, D. R. Swirling of a Liquid under the Influence of a Uniform Electric Field. *Nature*. 30 de mayo de 1964.

Brown, R; Camerini, P; Fowler, P. H; Muirhead, H; Powell, C. F; y Ritson, D. M. Observations with Electro- Sensitive Plates Exposed to Cosmic Radiation. Partes I y II. Nature. 8 y 15 de enero de 1949.

Buckles, R. G. In vivo Bubble Detection by Acoustic- Optical Imaging Techniques. Nature. 24 de mayo de 1969.

Burbidge, G.R y Burbidge, E. M. Quasi- stellar Objects- A Progress Report. Nature. 4 de octubre de 1969.

Burkhardt, L. C. y Lovberg, R. H. New Confinement Phenomena and Neutron Production in a Linear Stabilized Pinch. Nature. 25 de enero de 1958.

Butler, C. C. High- Energy Nuclear Physics. Achievements and Future Developments. Nature. 22 de mayo de 1965.

Butters, J. N; y Denby, D. Some Practical Uses of Laser Beam Photography in Engineering. The Journal of Photographic Science, Vol. 18. 1970.

Cano, F. H. y Martínez Ripoll. Cristalografía: transgrediendo los límites. Anales de la Real Sociedad Española de Química. Segunda época. Abril - Junio 2003.

Catalá De Alemany, J. La técnica fotográfica en física nuclear y radiación cósmica. Anales de la Universidad de Valencia. Curso 1951- 52. Año XXV.

Chadderton, L. T; y Torrens, I. M. Electron Microscope Observation of Nuclear Reactions. Nature. 25 de julio de 1964.

Chadwick, J. Possible Existence of a Neutron. Nature. 27 de febrero de 1932.

Chanteur, Jean; y Pellerin, P. Localization by Autorradiography at - 195° C of Radioactive Areas in Rats Exposed to a High Flux of Thermal Neutrons: Importance of Phosphorus- 32 in Consecutive Internal Irradiation. Nature. 6 de agosto de 1960.

Chargaff, E. Building the Tower of Babel. Nature. 26 de abril de 1974.

Church, Archibald. Recent Development in Television. Nature, 30 de septiembre de 1933.

Cook, A. H. Chromatographic Separation of Natural Compounds. Nature. 20 de agosto de 1949.

Corben, P. M; Reddish, V. C; y Sim, M. E. Speeding up Astronomical Photography. Nature. 3 de mayo de 1974.

Correspondent. History of Photography. Glaciology. Nature. 25 de julio de 1970.

Cosslett, V. E. Electron Microscopy Conference. Nature. 1 de enero de 1949.

Cosslett, V. E. Conference on Electron Microscopy, Delft. Nature, 17 de septiembre de 1949.

Cosslett, V. E. Electron Microscopy of Solid Surface. Nature. 22 de noviembre de 1952.

Cosslett, V. E. Microscopy with X-Rays. Nature, 23 de mayo de 1959.

Cosslett, V. E. y Nixon W. C. X-Ray Shadow Microscope. Nature. 7 de julio de 1951.

Cosslett, V. E. y Nixon, W. C. X-Ray Shadow Microscopy. Nature. 13 de septiembre de 1952.

Cosslett, V. E; y Duncumb, P. Micro- analysis by a Flying- Spot X-ray Method. Nature. 23 de junio de 1956.

Cosslett, V. E. Co- Ordination of Light and Electron Microscopy. Nature. 28 de mayo de 1960.

Courtney- Pratt, J. S. A Review of the Methods of High Speed Photography. London Physical Society. 20. 1957.

- Courtney- Pratt, J. S. High- Speed Photography. *Nature*. 29 de diciembre de 1956.
- Courtney- Pratt, J. S; y Thackeray, D. P. C. High Speed Photography. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 5, 1957.
- Craggs, J. D. Time- Resolved Spectroscopy. *Nature*. 16 de diciembre de 1961.
- Crick, F. The double helix: a personal view. *Nature*. 26 de abril de 1974.
- Cruikshank, Dale P. Possible Luminiscence Effects on Mercury. *Nature*. 12 de febrero de 1966.
- Cuevas, José. Fotografía, voluntad e incertidumbre. *Area abierta* nº 14. Julio 2006. UCM.
- Darlington, C. D. The Chromosome as a Physico- Chemical Entity. *Nature*. 17 de diciembre de 1955.
- Davies, J. G; Lovell, O. B. E, Pritchard, R. S; y Smith, F. G. Observations of the Russian Moon Probe Luna 9. *Nature*; 26 de febrero de 1966.
- De Rosier, D. J. y Klug, A. Reconstruction of Three Dimensional Structures from the Electron Micrographs. *Nature*. 13 de enero de 1968.
- Dee. P. I. Disintegration of Diplon. *Nature*. 14 de abril de 1934.
- Dee. P. I. Disintegration of Lithium under Proton Bombardment. *Nature*. 25 de noviembre de 1933.
- deLong, R. Use of Agar Diffusion and Fluorescent Antibody. *Nature*. 17 de junio de 1961.
- Doughty, G. Photographic Instrumentation at Ordnance Proving Grounds. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 5. 1957.
- Duke, C. B. Atoms and electrons at surfaces: A modern scientific revolution. *J. Vac. Sci. Tech. A* 2(2), 139- 43. 1984.
- Dunsmuir, R; Milner, C. J; y Spayne, A. J. Pinhole Radiography of Magnetrons. *Nature*. 14 de febrero de 1948.
- Echlin, P. y Fendley, J. A. Future of Electron Microscopy in Biology. *Nature*, 17 de agosto de 1973.
- Edwards, D. K. A Photographic Method for recording Activity and Behaviour in a Group of Small Animals. *Nature*. 28 de febrero de 1959.
- Ehrenberg, W, y Spear, W. E. X-Ray Micro- radiography of Biological Specimens. *Nature*. 22 de septiembre de 1951.
- Engel, C. E; y Knox, R. Serial Recording of Experiments. *Nature*. 23 de febrero de 1957.
- Eurcham. W. E. The One Million- Volt Accelerating Equipment of the Cavendish Laboratory, Cambridge. *Nature*. 6 de septiembre de 1947.
- Farrington, Benjamin. Science and the Classics. *Nature*, 30 de septiembre de 1961.
- Field, G. S. Vibrations in Solid Rods. *Nature*. 23 de julio de 1932.
- Fielder, G. Photographs of Mars taken by Mariner IV. *Nature*; 25 de septiembre de 1965.
- Fielder, G; Wilson, L. y Guest, J. E. The Moon from Luna 9. *Nature*; 26 de febrero de 1966.
- Finch, J. T; y Klug, A. Structure of Poliomyelitis Virus. *Nature*. 20 de junio de 1959.
- Fink, R. M; Dent, C. E; y Fink, K. Application of Filter Paper Partition Chromatography to Radioactive Tracer Studies. *Nature*. 6 de diciembre de 1947.

Franklin, R. E; y Gosling, R. G. Evidence for 2-Chain Helix in Crystalline Structure of Sodium Deoxyrinonucleate. *Nature*. 25 de julio de 1953.

Fraser, R. P; y Dombrowski, N. The Selection of a Photographic Technique for the Study of Movement. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 10, 1962.

Friedman, H. Twenty-five Years of Rocket and Satellite Astronomy. *Nature*. 26 de noviembre de 1971.

Fry, D. W. Gallop, J. W. Godward, F. K. y Dain, J. 30-MeV. Electron Synchrotron. *Nature*. 3 de abril de 1948.

Fry, D. W. High- Energy Particles and Machines for their Acceleration. *Nature*. 7 de octubre de 1950.

Fry, D. W. S-Harvey R. B, Mullett, L. B. y Walkinshaw, W. A Travelling- Wave Linear Accelerator for 4- MeV. Electrons. *Nature*. 27 de noviembre de 1948.

Gabor, D. A new Microscopic Principle. *Nature*. 15 de mayo de 1948.

Gabor, D. Character Recognition by Holography. *Nature*. 30 de octubre de 1965.

Gabor, D. Holographic Model of Temporal Recall. *Nature*. 10 de febrero de 1968.

Gabor, D. y Hampton, B. A Wilson Chamber with Time- Marking of Particle Tracks. *Nature*, 12 de octubre de 1957.

Gage, J. Photographic Method of Recording the Activity of Small Animals using Repetitive Electronic Flash. *Nature*. 26 de febrero de 1966.

Gancedo, J. R. Métodos espectroscópicos de análisis de superficies. *Bol. S.E.C y V*. Vol. 44. Nº 6.

Gates, J. W. C. Holographic Methods of Visualization and Measurements in Engineering. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 19, 1971.

George, L. A.; y Vogt, G. S. Electron Microscopy of Autoradiographed Radioactive Particles. *Nature*. 7 de noviembre de 1959.

Gates, J. W. C. Holographic Methods of Visualization and Measurements in Engineering. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 19, 1971.

George, L. A.; y Vogt, G. S. Electron Microscopy of Autoradiographed Radioactive Particles. *Nature*. 7 de noviembre de 1959.

Green, B. C; y Spinks, J. W. T. Lapse-Time Motion Picture Studies of Soil-burrowing Insects. *Nature*. 8 de febrero de 1958.

Greguss, P. Bioholography - a New Model of Information Processing. *Nature*. 3 de agosto de 1968.

Grenall, A. Direct Observation of Dislocation in Graphite. *Nature*. 16 de agosto de 1958.

Groves, G. V. Upper-Atmosphere Wind Studies by Skylark Rocket Sodium Experiment. *Nature*. 17 de septiembre de 1960.

Hagerman, D. C. y Mather, J. W. Neutron Production in a High Pinch Apparatus. *Nature*. 25 de enero de 1958.

Hall, C. E. y Schoen, A. L. Application of the Electron Microscope to the Study of Photographic Phenomena. *Abride Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories*. No. 790.

Hamilton, L. D. Models and Reality. *Nature*. 18 de mayo de 1968.

Hanson, A. W. Taylor, C. A; y Lipson, H. Fourier Synthesis by Optical Interference. *Nature*. 28 de julio de 1951.

Harrison, D. C. Chromatography. *Nature*. 5 de febrero de 1955.



- Hassett, N. J. Discontinuities in Liquid Fluidized Beds. *Nature*. 14 de agosto de 1965.
- Heard, B. E. Photographs of Serial Sections of the Lung projected rapidly in Sequence using 16 mm. Film. *Nature*. 14 de agosto de 1954.
- Herman, R. H.; Clayton, L. E.; y Bruton, J. Preparation of Ultra- Violet Fluorescent Photographs of Stereoids. *Nature*. 13 de enero de 1962.
- Hillson, P. J. Early Thermographic Systems, I, Hunt, 1840. *The Journal of Photographic Science*. Vol. 31. 1983.
- Hodgkin, D; y otros. Structure of Vitamin B12. *Nature*. 20 de agosto de 1955.
- Holwill, M. E. J; Silvester, N. R; y Johnston, D. N. High- Speed Cinematography of Microscopic Organism. *The Journal of Photographic Science*. Vol. 27. 1979.
- Hooper, C. W; Seeds, W. E; y Stokes, A. R. Photographic Preparation of Masks of Large Molecules for the Lipson Diffractometer. *Nature*. 16 de abril de 1955.
- Hunter, J. R. Photographic Recording of Agar Diffusion Plates. *Nature*. 2 de mayo de 1959.
- Hurter, Ferdinand y Driffield, Vero Charles. Photochemical Investigations and a New Method of Determination of the Sensitiveness of Photographic Plates. *Journal of the Society of Chemical Industry*, 1890. Memorial volume. Royal Photographic Society, 1920.
- Huxley, A. F; y Niedergerke, R. Structural Changes in Muscle During Contraction. *Nature*. 22 de mayo de 1954.
- Ingram, D. J. E. From Radar to Spectroscopy: New regions of the Spectrum. *Nature*, 16 de septiembre de 1961.
- Jacobs, J. E; y Kim, S. U. A new penetrating-radiation image converter. *Nature*. 25 de octubre de 1974.
- James, T. H. The Change in the Concepts and Outlook of the Photographic Scientist: 1928- 1978. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 26, 1978.
- Jodrell Bank Experimental Station, de la Universidad de Manchester. Radar Observations of the First Russian Earth Satellite and Carrier Rocket. *Nature*; 9 de noviembre de 1957.
- Jones, H; y Eagles, J. E. Incorporation of Assimilated Carbon Into the Walls of Xylem Elements. *Nature*. 18 de agosto de 1962.
- Jones, L. A. Rectangle Proportions in Pictorial Composition. *Abridge Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories*. No. 410. 1930.
- Kendrew, J. C. Architecture of a Protein Molecule. *Nature*. 20 de septiembre de 1958.
- Kendrew, J. C. Structures of Proteins. *Nature*. 9 de enero de 1954.
- Kendrew, J. C; y otros. A Three-Dimensional Model of the Myoglobin Molecule Obtained by X-Ray Analysis. *Nature*. 8 de marzo de 1958.
- Kendrew, J. C; y otros. Structure of Myoglobin. A Three-Dimensional Fourier Synthesis at 2 Å Resolution. *Nature*. 13 de febrero de 1960.
- Kessler, L. W; Korpel, A; y Palermo, P. R. Acoustic Microscope operating at 100 MHz. *Nature*; 9 de julio de 1971.
- Kessler, L. W; Korpel, A; y Palermo, P. R. Simultaneous Acoustic and Optical Microscopy of Biological Specimens. *Nature*. 8 de septiembre de 1972.
- Kolm, Henry H. Advances in the Generation and Use of Very High, Continuous Magnetic Fields. *Nature*. 8 de octubre de 1961.

Komesaroff, M. M; McCulloch, P. M; Hamilton, P. A.; Cooke, D. J. Spectral Fine Structure in Pulsar Radiation. *Nature*. 26 de octubre de 1968.

Koutchmy, S. Laffineur, M. Photometric Study of the Solar Corona. *Nature*. 20 de junio de 1970.

Kraus, J. D; y Ko, H. C. A Detailed Radio Map of the Sky. *Nature*, 22 de enero de 1955.

Kraus, John D. Distribution of Radio Brightness Across the Andromeda Nebula. *Nature*. 19 de marzo de 1955.

Latham, F. A Man-Carrying Centrifuge. *Nature*. 18 de junio de 1955.

Latham, R. Thermonuclear Research in Great Britain. *Nature*. 3 de octubre de 1959.

Latham, R; y otros. Growth of Surface Instabilities in a Linear Pinched Discharge. *Nature*. 21 de mayo de 1960.

Lauterbur, P. C. Image Formation by Induced Local Interactions: Examples Employing Nuclear Magnetic Resonance. *Nature*. 16 de marzo de 1973.

Lawson, R. W. Blinking: Its Role in Physical Measurements. *Nature*. 31 de enero de 1948.

Lee, Everett. S, y Foust, C. M. Measurement of Surge Voltages on Transmission Lines Due to Lightning. *General Electric Review*. Vol. 30. No. 3. Marzo de 1927.

Lewis, J. B; y Partridge, B. A. Fluidization. *Nature*. 14 de octubre de 1967.

Lonsdale, K. Neutron Diffraction by Crystals. *Nature*. 6 de agosto de 1949.

Lovell, A. C. B. The New Science of Radio Astronomy. *Nature*, 20 de enero de 1951.

Lowarch, W. Applications of the Schlieren Technique to the Study of Ripples. *Nature*. 15 de septiembre de 1956.

Mackay, C. D. y Milson, A. S. Imaging in Astronomy. *Nature*. 8 de septiembre de 1972.

MacKay, D. M. Moving Visual Images Produced by Regular Stationary Patterns. *Nature*. 26 de octubre de 1957.

Magyar, G. Ultrashort Laser Pulses and their uses. *Nature*. 6 de abril de 1968.

Mallory, W. R. Reflectivity of Atmospheric Shock Waves. *Nature*. 8 de enero de 1966.

Mamuro, T; Fujita, T; Matsunami, T; Yoshikawa, K. Microscopic Examination of Highly Radioactive Fall- Out Particles. *Nature*. 10 de noviembre de 1962.

Mamuro, T; Fujita, T; Matsunami, T; Yoshikawa, K; y Azuma T. Radioactive Air-Borne Dusts in Japan. *Nature*. 19 de mayo de 1962.

Marey E. J. A Study on Locomotion. *Nature*, 13 de marzo de 1879.

Mason, J. H. Electrophotography of Internal Discharges in Dielectrics. *Nature*. 10 de septiembre de 1949.

Matthews, C. M. E. Labelled Fluoroborate in the Stomach of Rats. *Nature*. 27 de mayo de 1967.

Mayneord, W. V; Turner, R. C; Newbery, S. P; y Hodt, H. J. A Method of Making Visible the Distribution of Activity in a Source of Ionizing Radiation. *Nature*. 3 de noviembre de 1951.

McCall, G. J. H. Implications of the Mariner IV Photography of Mars. *Nature*, 24 de septiembre de 1966.

McGee, J. D. Campbell Swinton and Television. *Nature*, 17 de octubre de 1936.

- McLean S. An Autorradiographic Effect. *Nature*. 12 de agosto de 1961.
- McVeagh, J. S. Multiple Spark Photography. *The Journal of Photographic Science*, Vol. 18, 1970.
- Medford, R. D; Powell, A. L. T; y Fletcher, W. H. W. Existence of Weak R-Type Ionization Fronts. *Nature*. 6 de octubre de 1962.
- Mees, C. E. Keneth. The Production of Scientific Knowledge. *Nature*, Jan. 3, 1918.
- Meldola, Raphael. The Photographic Image. *Nature*, July 10, 1890.
- Merrison, A. W; y Wiblin, E. R. The Harwell Time-Of-Flight Neutron Spectrometer. *Nature*. 3 de marzo de 1951.
- Michaelis, A, R. Cinematography in Scientific Research. *Nature*. 15 de octubre de 1955.
- Michaelis, A. R. Scientific Cinematography in Great Britain. *Nature*. 6 de octubre de 1956.
- Miller, J. S. y Wampler, E. J. Television Detection of the Crab Nebula Pulsar. *Nature*. 15 de marzo de 1969.
- Millikan, R. A, y Cameron, G. H. New Results on Cosmic Rays. *Nature*, 7 de enero de 1928.
- Mitchell, J. W. Photographic Sensitivity. *Rep. Prog. Phys. London Physical Society*. 20. 433. 195. 1957.
- Montgomery, P, O'B; y Hundley, L. L. Televisión Microscopy. *Nature*. 16 de diciembre de 1961.
- Moon, P. B. Developments in Gamma- Ray Optics. *Nature*. 13 de febrero de 1960.
- Morton, B. R. Model Experiments for Vortex Columns in the Atmosphere. *Nature*. 2 de marzo de 1963.
- Moss, H. Application of photography in Physics. En Op. cit. Photography as scientific implement. *Collective Work.. Proc. Phys. Soc., Vol. XXXIII*.
- Nature, C. E. . Flame Movements in Gaseous Explosions. *Nature*. 16 de abril de 1932.
- Nature Editorial. Cloud Chamber and Associated Techniques. *Nature*, 14 de mayo de 1955.
- Nature Editorial. Dislocation on View. *Solid State. Nature*. 11 de enero de 1969.
- Nature Editorial. Magnetic Recording and Reproducing in Broadcasting. *Nature*, 24 de marzo de 1934.
- Nature Editorial. Mariners Reach Mars. *Nature*; 26 de julio de 1969.
- Nature Editorial. Mars Still Mysterious. *Nature*, 9 de agosto de 1969.
- Nature Editorial. New Subnuclear Particles. *Nature*. 1 de febrero de 1969.
- Nature Editorial. Pulsar Flashes Photographed. *Nature*. 15 de marzo de 1969.
- Nature Editorial. Release of Information on Atomic Energy. *Nature* del 22 de marzo de 1947.
- Nature Editorial. Scientific Freedom and National Security. *Nature* de 26 de abril de 1952.
- Nature Editorial. Scientific Research in the Pacific Area. *Nature* del 22 de marzo de 1947.
- Nature Editorial. Seeing with Megavolts. *Electron Microscopes. Nature*. 11 de abril de 1970.

Nature Editorial. Some Developments in Astronomical Instruments. Nature. 3 de septiembre de 1949.

Nature Editorial. The Armament Research and Development Establishment. Nature. 6 de febrero de 1960.

Nature Editorial. The Electron Microscope. Nature. 2 de julio de 1932.

Nature Editorial. The National Physical Laboratory. Nature. 17 de agosto de 1963.

Needham, J; Ling, W; y Price, D. J. Chinese Astronomical Clockwork. Nature. 31 de marzo de 1956.

Newkirk, G. y Lacey, L. Eclipse not Spoilt by Shortage of Funds. Nature. 20 de junio de 1970

Ney, E. P; y Pepin, T. J. Observations on Stellar Axtintion obtained in the Gemini 9 Space Flight. Nature. 24 de septiembre de 1966.

O. Brien, R. T; y George, L. A. Preparation of Autoradiograms for Electron Microscopy. Nature 23 de mayor de 1959.

Occhialini G. P. S; y Powell, C. F. The Artificial Production of Mesons. Nature. 10 de abril de 1948.

Occhialini, G. P. S; y Powell, C. F. Nuclear Disintegrations Produced by Slow Charged Particles of Small Mass. Nature. 8 de febrero de 1947.

Occhialini, G. P. S; y Powell, C. F. Observations on the Production of Mesons by Cosmic Radiation. Nature. 31 de julio de 1948.

Olby, R. DNA before Watson-Crick. Nature. 26 de abril de 1974.

Ostroff, Eugene. Early Fox Talbot Photographs and Restoration by Neutron Irradiation. The Journal of Photographic Science, Vol. 13, 1965.

Ostroff, Eugene. Etching, Engraving and Photography: History of Photomechanical Reproduction, y Photography and Photogravure: History of Photomechanical Reproduction, ambos en Journal of Photographic Sciences, Vol. 17, 1969.

P. Kirkpatrick. An Approach to X-Ray Microscopy. Nature. 12 de agosto de 1950.

P.S. y G. G. Impact of TV sensors on Astronomical Research. Nature. 1 de febrero de 1974.

Pauling, L. Molecular basis of biological specifity. Nature. 26 de abril de 1974.

Pauling, L; y Corey, R. B. Compound Helical Configurations of Polypeptide Chains: Structure of Proteins of the  $\alpha$ - Keratin Type. Nature. 10 de enero de 1953.

Pellas, P; y otros. Primitive Low - Energy Particle Irradiation of Meteoritic Crystals. Nature. 19 de julio de 1969.

Penrose, R. Black Holes and Gravitational Theory. Nature; 21 de abril de 1972.

Perutz, M. F. Sir Lawrence Bragg. Obituary. Nature. 3 de septiembre de 1971.

Perutz, M. F; y otros. Structure of Haemoglobin. A Three-Dimensional Fourier Synthesis at 5.5 Å Resolution, Obtained by X-Ray Analysis. Nature. 13 de febrero de 1960.

Peterson, A. W; y Kieffaber, L. M. Infrared Photography of OH Airglow Structures. Nature, 30 de marzo de 1973.

Pickavance, T. G. y Stafford, G. H. High- Energy Nuclear Physics. Nature. 21 de julio de 1956.

Poole, J. H. J; y Bremmer, J. W. Investigation of the Radioactivity of Rocks by the Photographic Method. Nature. 5 de junio de 1948.

Poole, J. H. J; y Bremmer, J. W. Investigations of the Distribution of the Radioactive Elements in Rocks by the Photographic Method. Nature. 22 de enro de 1949.



- Porter, G; y Topp, M. R. Nanosecond Flash Photolysis and the Absorption Spectra of Excited Singlet States. *Nature*. 21 de diciembre de 1968.
- Potter, J. M; y McDonald, D. A. Cinematographic Recording of the Velocity of Arterial Blood- Flow. *Nature*. 7 de octubre de 1950.
- Pounds, K. A. Recent Developments in X-ray Astronomy. *Nature*; 29 de enero de 1971.
- Powell, C. F; y Rosenblum, S. A New Method for the Determination of the Mass of Mesons. *Nature*. 27 de marzo de 1948.
- Powell. C. F; y Fertel, G. E. F. Energy of High- Velocity Neutrons by the Photographic Method. *Nature*. 15 de julio de 1939.
- Predstige, E. B. y Yates, D. J. C. Imaging the Rhodium Atom with a Conventional High Resolution Electron Microscope. *Nature*. 10 de diciembre de 1971.
- Pressey, B. G. Rocket and Satellite Instrumentation. *Nature* 22 de octubre de 1960.
- Price, P. B; y Walker, R. M. Observation of Fossil Particle Tracks in Natural Mica. *Nature*. 24 de noviembre de 1962.
- Purves, P. E. Locomotion in Whales. *Nature*. 26 de enero de 1963.
- Quinn, R. G. Laboratory Observations of Plasma Instabilities in a Dipole Magnetic Field. *Nature*. 23 de octubre de 1965.
- Ramm, C. A. Development of High Energy Neutrino Experiments at CERN. *Nature*. 9 de marzo de 1968.
- Reed. R. Progress in Electron Microscopy. *Nature*. 29 de noviembre de 1947.
- Reines, F. Cowan, C. L. The Neutrino. *Nature*. 1 de septiembre de 1956.
- Ressler, N. Application of Direct Photographic Photometry to Preparative Electrophoresis. *Nature*. 16 de agosto de 1958.
- Roberts, J. B. G; y Turner, J. P. Impact of Plasma on a Dipole Magnetic Field. *Nature*. 19 de febrero de 1966.
- Robillard, Jean. J. New Approaches in Photography. *Photographic Science and Engineering*, Vol. 8, 1964.
- Roblat, J. y Catalá J; y Gibson W. M. Range- Energy Relation for Protons and Alpha-Particles in Photographic Emulsions for Nuclear Research. *Nature*. 7 de abril de 1951.
- Rochester, G. D. The Study of Sub- Atomic Phenomena by the Nuclear Emulsion. *Nature*. 15 de octubre de 1960.
- Ronca, L. B. Structure of the Crater Alphonsus. *Nature*; 8 de enero de 1966.
- Rose, B. Taylor, A. E, y Wood, E. Measurement of the Neutron Spectrum from Zeta. *Nature*, 14 de junio de 1958.
- Rothschild, M; y otros. Jump of the Oriental Rat Flea *Xenopsylla cheopis* (Roths). *Nature*. 1 de septiembre de 1972.
- Rowe, P. N; y otros. Bubbles in Fluidized Beds. *Nature*. 21 de julio de 1962.
- Royal Aircraft Establishment, de Fanborough Observations on the Orbit of the Russian Earth Satellite. *Nature*. 9 de noviembre de 1957.
- Russell, P. C. Soft X-ray Image of the Sun. *Nature*, 13 de febrero de 1965.
- Rutherford, E. Origin of the Gamma Rays. *Nature*. 26 de marzo de 1932.
- Rutherford, Ernest. Artificial Disintegration of the Elements. *Nature*, 6 de Mayo de 1922.
- Rutherford, Ernest. Science in Development. *Nature*, 21 de noviembre de 1936.

Ryle, M. The Mullard Radio Astronomy Observatory, Cambridge. Nature, 20 de julio de 1957.

Sagan, Carl, y Pollack, James B. On the Nature of the Canals of Mars. Nature. 8 de octubre de 1966.

Saidey, F; Morgan, W. A; y Wark, D. Q. Determination of Cloud Altitudes from Gemini- Titan 5. Nature; 20 de noviembre de 1965.

Sellin, R. H. J. Existence of a Surface Tension Discontinuity at a Liquid Free Surface. Nature. 10 de febrero de 1968.

Shahbazian, S. M. Photosensitive Systems for Laser Exposure in the Printing Industry. The Journal of Photographic Science. Vol. 32. 1984.

Sheppard, L. M. Shock Wave from a Release of Gas at 110 km Altitude. Nature. 2 de julio de 1966.

Shiers, George. Ferdinand Braun and the Cathode Ray Tube. Scientific American; marzo 1974.

Silverman, M; y Simon, M. Flagellar rotation and the mechanism of bacterial motility. Nature. 3 de mayo de 1974.

Slater Price, T y Rawling, S. O. The Theory of Photographic Sensitivity. Nature, 22 de Agosto, 1925.

Smalley, V. G; y Ronca, L. B. Structures Inside a Lunar Crater Photographed by Ranger VII. Nature; 4 de diciembre de 1965.

Smith, J. R; Fozzard, H. A. Localization of Tritiated "Digoxin" in the Myocardial Cells of Frogs and Dogs by Autoradiography Combined with Electron Microscopy. Nature. 9 de febrero de 1963.

Steiner, George. Mathematical Literacy for the Non- mathematician. Nature. 11 de mayo de 1973.

Steinherz, H. A. Redhead. P. A. Ultrahigh Vacuum. Scientific American, 2- 13. Marzo de 1962.

Stent, G. S. Molecular biology and metaphysics. Nature. 26 de abril de 1974. p 779.

Stephenson, F. R. The Earliest Known Record of a Solar Eclipse. Nature. 14 de noviembre de 1970.

Steward, V. W. y Koehler, A. M. Proton radiographic Detection of Strokes. Nature. 7 de septiembre de 1973.

Stewart, C. P. Royal Aircraft Establishment, Bedford. Nature, 19 de octubre de 1957.

Sweet, R. G. High Frequency Recording with Electrostatically Deflected Ink Jets. Rev. Sci. Instr., 36. Enero de 1965

Thomas, G. M. Auroral photography Using All Sky Cameras. The Journal of Photographic Science, Vol. 8, 1960.

Thonemann, P. C; y otros. Production of High Temperatures and Nuclear Reactions in a Gas Discharge. Nature. 25 de enero de 1958.

Thorne Baker. T. Recent work in the Telegraphic Transmission of Pictures. Nature, 13 de Enero de 1910.

Thorpe, S. A. A Sediment Cloud Below the Mediterranean Flow. Nature. 6 de octubre de 1972.

Tolansky, S. Shadow Microscopy for Measurement of Height. Nature. 28 de marzo de 1953.

Toy, F. C. The Mechanism of Formation of the Latent Photographic Image. Nature, 24 de septiembre de 1927.

Tschiderer, I. The Photomicrography of Nuclear Tracks. Abridged Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 1326. 1950.

Tubbs, M. R. 1976 Electrophotography Conference. The Journal of Photography Science, Vol 25, 1977.

Tutton, A. E. H. Great advance in Crystallography. Nature, July 17, 1913.

Tutton, A. E. H. The Crystal Space-lattice revealed by Röntgen Rays. Nature, November 14, 1912.

Valentine, J. D. Is Visual Memory Holographic?. Nature. 2 de noviembre de 1968.

Vandiver, J. K. High speed colour schlieren photography. Nature. 29 de noviembre de 1974.

Vogel, S; y Feder, N. Visualization of Low- speed Flow using Suspended Plastic Particles. Nature. 8 de enero de 1966.

VV. AA. Rocket Observation of the Corona on March 7, 1970. Nature; 18 de abril de 1970.

VV. AA. Rocket UV Flash Spectra from the Solar Eclipse of March 7, 1970. Nature; 18 de abril de 1970.

VV.AA. Solar UV Flash Spectrum 1400 Å- 1960 Å. Nature; 22 de agosto de 1970.

Waddington, C. H. Some European Contributions to the Prehistory of Molecular Biology. Nature. 25 de enero de 1969.

Waldmeier, M. Swiss Solar Eclipse Expedition to Mexico. Nature. 20 de junio de 1970.

Webb, J. H. Photographic Plates for the Use in Nuclear Physics. Abridged Scientific Publications from the Kodak Research Laboratories. No. 1182. Originalmente publicado en Physical Review. 74, 1948.

Weil, H. y Trevor, W. I. History of Chromatography. Nature. 9 de diciembre de 1950.

Wells, J. W. Coral Growth and Geochronometry. Nature. 9 de marzo de 1963.

West, D. y Sherwood, A. C. Radiography with 160 MeV Protons. Nature. 15 de septiembre de 1972.

White, E. L. C. Automatic Recording of Heaviside Layer Heights. Nature. 16 de abril de 1932.

Wilkins, M. H. F; Gosling, R. G; y Seeds, W. E. Physical Studies of Nucleic Acid. Nature. 12 de mayo de 1951.

Wilkinson, D. H. Flight Recorders; a Technique for the Study of Bird Navigation. Nature. 4 de febrero de 1950.

Williamson, R; y otros. A fly's leap from paralysis. Nature. 15 de noviembre de 1974.

Winning, C. H. Enhanced Initiating Effect of Multiple Shock Intersections. Nature. 7 de enero de 1956.

Wood, J. A. Chondrules and the Origin of the Terrestrial Planets. Nature. 14 de abril de 1962.

Wright, J. K; y otros. A new "Wedge" Type Instability Observed in a "Theta" Pinch. Nature. 9 de septiembre de 1961.

Wyckoff, Ralph, W. G. The Electron Microscopy in Biology. Nature, 6 de marzo de 1954.

Young. D. A. Etching of radiation Damage in Lithium Fluoride. Nature. 9 de agosto de 1958.

Zawidzki, T. W; y Papér, H. M. Pseudo- whiskers of Ice, grown from Clouds of Supercooled Water in an Electric Field. Nature. 10 de noviembre de 1962.

## **OTRAS OBRAS CONSULTADAS**

- Antonioni. Michelangelo. El desierto rojo. 1964. (Guión cinematográfico)
- Barbas C. y Rupérez F. J. En memoria de Tswett. 100 años de cromatografía. (Sin publicar)
- Fontanella, Lee. La historia de la Fotografía en España. Desde sus orígenes hasta 1900. El Viso, 1981.
- Freund, G. La fotografía como documento social. Gustavo Gili, 1983. [“Photographie et Société”, Editions du Seuil, París, 1974].
- Gurney, R. W. y Mott, N. F. The Theory of the Photolysis of Silver Bromide and the Photographic Latent Image. Proc. Royal Society. 164 A. 151. 1938.
- Greenough, S; Snyder, Joel; Travis, David; Wseterbeck, Colin. On the Art of Fixing a Shadow. One Hundred and Fifty Years of Photography. National Gallery of Art. The Art Institute of Chicago, 1989.
- Hodges, A. Alan Turing, the enigma. Touchstone Ed. 1984.
- Lalumia. J. Ettore Majorana and Atomic Bomb. Chapel Hill, 1993.
- Latour, Bruno and Weibel Peter (editors). Iconoclash. Beyond the image wars in science, religious and art. Ed: KZM y The MIT Press 2002.
- Lemagny, J.C. y Rouillé, A. Historia de la Fotografía. Alcor, 1988. [“Histoire de la Photographie”. Bordas, S. A. París. 1986]
- Lenin. V. I. Materialismo y empiriocriticismo. Ayuso. 1974
- Panofsky, Erwin. Estudios sobre iconología. Alianza Universidad, 1979. Studies in Iconology. Harper Torchbook, 1962.
- Rosenblum, Naomi. A World History of Photography. Abbeville Press. 1984.
- Serres, Michel. Historia de las Ciencias. Cátedra, 1991[“Éléments d’Histoire des Sciences”. Bordas, 1989].
- Sontag, Susan. On photography. Anchor Books, 1990.
- Szarkowski, J. Photography until now. MOMA, 1989.
- Wiener. Norbert. Cibernética, o el control y comunicación en animales y máquinas. Metatemas 8, Tusquets Ed. 1998. [Título original: Cybernetics or Control and Communication in the animal and the Machine. MIT, 1948 y 1961.]

## **DOCUMENTACIÓN CONSULTADA EN INTERNET**

- [www.kodak.com/eknec/](http://www.kodak.com/eknec/)
- Hickman, Bert. What are Lichtenberg Figures and How are they created?. [www.teslamania.org](http://www.teslamania.org) . 1995- 2005.
- Martínez- Val, Juan. Historias y Tecnologías del Arte de Imprimir. Ed: [www.juanval.net/iber2/historia\\_index.htm](http://www.juanval.net/iber2/historia_index.htm). 2005. La escritura y el libro en la antigüedad
- Nasa Editorial. [www.history.nasa.gov](http://www.history.nasa.gov).
- Nobel Editions. Pieter Zeeman. Biography. Nobel Prizes. <http://nobelprize.org>.
- Olympus Editorial. [www.olympus.com](http://www.olympus.com).



Philips. Microscopía Electrónica. [www. feicompany.com](http://www.feicompany.com).

Yurcik, William J. Printing Devices. [www.bookrags. com /sciences/ computerscience/ printing-devices-2005](http://www.bookrags.com/sciences/computerscience/printing-devices-2005).

# Origen de las ilustraciones

## Capítulo 2

- 2.1: Michel Serres. Historia de las Ciencias. Ed. Cátedra, 1989
- 2.2. Enciclopedia Larrouse. 1960.
- 2.3. Los Alamos Scientific Labs. 1950.
- 2.4. British Museum. Londres.
- 2.5. Archivo IBM
- 2.6. Archivo IBM
- 2.7. Konrad Zuse. Hünfeld, Germany.
- 2.8. Bell Telephone Laboratories. AT&T. Lucent Technologies.
- 2.9. Science Museum. United Kingdom.
- 2.10. National Maritime Museum, Greenwich, London.
- 2.11. The Institution of Engineering and Technology. Stevenage. UK.
- 2.12. Tratado elemental de física aplicada. Ed: A. Garnot. París. 1857.
- 2.13-15. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra.
- 2.16. Nature, 1878.
- 2.17. Hª de la Humanidad. Planeta. Unesco. 2007.
- 2.18. Biblioteca Nacional. Madrid.
- 2.19. Biblioteca Nacional, Gabinete de estampas. París
- 2.20. Kupferstich-Kabinett, Staatliche Kunstsammlungen Dresden.
- 2.21. Eastman Kodak Company. Rochester. Nueva York.
- 2.22. Jackson y Chatto. Bohn. 1861.
- 2.23. London News, 1881.
- 2.24. La Ilustración. 1893.
- 2.25. The National Media Museum. Photography, Film and Television. Bradford.
- 2.26. Musée Denon de Chalon-sur-saône.
- 2.27. Eastman Kodak Company. Rochester. Nueva York.
- 2.28. Société française de photographie. París.
- 2.29. George Eastman House, Rochester, Nueva York.
- 2.30. Eastman Kodak Company. Rochester. Nueva York.
- 2.31-32. Karl Blossfeldt Archive.
- 2.33-34. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.
- 2.35-37. The National Media Museum. Photography, Film and Television. Bradford.
- 2.38. London Physical Society.
- 2.39. Nasa Archives. San Francisco.
- 2.40. IBM Archives. Armonk, New York.
- 2.41. Clarendon Press. Gloucester.
- 2.42. CBM Severo Ochoa CSIC. Madrid.
- 2.43. Iliffe and sons. Londres.
- 2.44-45. Hickman, Bert. (Col. Privada)
- 2.46-47. General Electric Company. Nueva York.
- 2.48. The Metropolitan Museum of Art. Nueva York.

- 2.49-53. Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid.
- 2.54. Nature, 1901.
- 2.55-56. Brown University. Rhode Island.
- 2.57-58. Blackie and Son Limited.
- 2.59. Archive für Anatomie. Physiologie und wissenschaftliche Medizin 1847. Berlín.
- 2.60. Société française de photographie. París.
- 2.61. Henry S. King and Co. 1874.
- 2.62. Physiologie et en Medecine. G. Masson. Paris 1878.
- 2.63. Nature, Feb. 4, 1961.
- 2.64. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.
- 2.65. Cambridge University. Cavendish Lab. 1913.
- 2.66. Nature, 1880.
- 2.67. The Cavendish Lab. Cambridge University. 1928.
- 2.68. Imperial College of Science and Technology. Londres. 1962.
- 2.69. W. & J. George Ltd. - F.E. Becker & CO. 1936.
- 2.70. University of Illinois College of Medicine. 1960.
- 2.71. Naval Research Laboratory. Harwell, Oxfordshire. 1958.
- 2.72. F.B.S. Falkner Nuclear Research Lab. School of Physics. Univ. of Sidney. 1959.
- 2.73. Atomic Weapons Research Establishment, Aldermaston. 1959.
- 2.74. Radiation Laboratory, Univ. of Strathclyde. 1965.
- 2.75. Ferranti Technologies Ltd. Archives.
- 2.76. Kent Electronics Corp., Houston. 1962.
- 2.77. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra.
- 2.78. Helmut Gernsheim Collection.
- 2.79-82. Unión Internacional de Telecomunicaciones. Ginebra.
- 2.83. T. Thorne Baker. Nature. 13 de enero de 1910.
- 2.84. Wiley Publishers. 1949.
- 2.85-86. Addison- Wesley Publishing Company.
- 2.87. Fournier D'Albe. Nature 16 de junio de 1923.
- 2.88-9. Gauthier Villars et fils. G. Masson, París. 1892.
- 2.90. Spéos Museum.
- 2.91-97. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.
- 2.98. Blackie and Son Limited, 1923.
- 2.99. Laboratory Equipment Co. 1927.

### **Capítulo 3.**

- 3.1. Smithsonian Institution. Washington.
- 3.2. Nature, 1880.
- 3.3. Richard Clay and sons. 1896.
- 3.4. Espasa Calpe. 1946.
- 3.5-6. Nature 1896.
- 3.7. Scientific American. 1974.
- 3.8. Cambridge University Press. 1916.
- 3.9. Scientific American. 1974.
- 3.10. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.

- 3.11. Paula and Robert Hershkowitz, Sussex.
- 3.12. New Haven Univ. Press. 1911.
- 3.13. Jessie Wilson. CWP. (Col Privada)
- 3.14. Blackie and Son Limited.
- 3.15. Bragg. Radiactivity. 1912.
- 3.16. Proc. Roy. Soc. London A. 1912.
- 3.17-18. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 3.19. Gentner, Maier- Leibnitz, y Bothe. Atlas typischer Nebelkammerbilder, 1940.
- 3.20. George Rochester.<sup>2</sup>
- 3.21-2. Nature, 17 de julio de 1913. p 518.
- 3.23. W. H y W. L. Bragg. "X- rays and Crystal Structure".1920.
- 3.24. Instituto Química Física Rocasolano. CSIC, Madrid. 2003.
- 3.25. Kelly Field. 1922.
- 3.26. University of Chicago. Press.
- 3.27. Norman Bridge Lab. de Pasadena.
- 3.28. R. A. Millikan. 1929.
- 3.29. R. A. Millikan.1931.
- 3.30-32. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 3.33. John Wiley & sons, 1946.
- 3.34. Musée des arts et métiers CNAM, París.
- 3.35. Ed. Centro de Estudio Constitucionales. 1988.
- 3.36. Ronan Picture Library.
- 3.37. AIP Emilio Segré Visual Archives.

#### **Capítulo 4.**

- 4.1-2. Deutsche Museums, Munich.
- 4.3-4. VVS Saarbrücken. Berlin.
- 4.5. Science Museum. Londres.
- 4.6. Bell Laboratories. New Jersey.
- 4.7. Nature, 14 de diciembre de 1957.
- 4.8. Kepteyn Laboratory. Ekers and Sancisi. 1977.
- 4.9. American Association for the Advancement of Science.
- 4.10. John Wiley & sons, 1946.
- 4.11-15. RCA Corporation of America.
- 4.16. General Electric Company.
- 4.17. Carl Zeiss (London) Ltd.
- 4.18. General Electric Company.
- 4.19. Evans Electroselenium Ltd. Essex.
- 4.20. A. Gallenkamp & Co. Ltd. Londres.
- 4.21. RCA Corporation of America.
- 4.22. General Electric Company.
- 4.23. Weston Electrical Services. Ltd.
- 4.24. General Electric Company.
- 4.25. Weston Electrical Services. Ltd.
- 4.26. Société des Editions Radio. París.
- 4.27. Avimo Ltd. Taunton. Eng.
- 4.28. A.C. Cossor Ltd. Londres.



- 4.29. Philips Electrical. Ltd.
- 4.30. Wray (Optical Works) Ltd. Kent.
- 4.31-32. D. Shackman & Sons.
- 4.33. A.C. Cossor Ltd. Londres.
- 4.34. Wray (Optical Works) Ltd. Kent.
- 4.35. T. E. Allibone. (Col. Privada)
- 4.36. Tektronix. Inc. Portland.
- 4.37. Société des Editions Radio. París.
- 4.38-40. Correo Nacional Aemán.
- 4.41-42. RCA Corporation of America.
- 4.43. Proc. Inst. Radio. Engrs.
- 4.44-45. RCA Corporation of America.
- 4.46. National Broadcasting Company.
- 4.47. Neutronics Research Company.
- 4.48. Emil Mechau. BBC. Corp.
- 4.49. Mullard. Ltd.
- 4.50. Philips Electrical. Ltd.
- 4.51. Metropolitan Vickers Electrical Co. Ltd.
- 4.52. David Scharf. Thames and Hudson.
- 4.53. Rosier Kluge. Nature, 13 de enero de 1968.
- 4.54. Rosier Kluge. Nature, 13 de enero de 1968.
- 4.55. J.A. Aznárez. Inst. Torres Quevedo. CSIC. Madrid.
- 4.56. Nature, 11 de enero de 1969.
- 4.57. Prestidge y Yates. Nature, 10 de diciembre de 1971.
- 4.58. Cambridge Scientific Instruments Ltd.
- 4.59. Naval Research Laboratory. Harwell, Oxfordshire. 1958.
- 4.60. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 4.61. PMS: Blackett. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 4.62-64. I. Curie- J.F. Joliot. CNRS.
- 4.65. Chadwick, Blackett, Occhialini. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 4.66-67. D. A. Glaser. University of Michigan.
- 4.68. CERN. Ginebra.
- 4.69. Unibersity of California. Berkeley.
- 4.70. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 4.71. M.Oliphant y P.I. Dee. Nature, 14 de abril de 1934.
- 4.72. P. I. Dee, E. T. S. Walton. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.
- 4.73. Berenice Abbott.
- 4.74-75. Massachusetts Institute of Technology.
- 4.76. W. F. Westendorp Research Laboratory, General Electric Company,  
Schenectady, Nueva York.
- 4.77. Nature, April 16, 1971.
- 4.78. Steward- Koheler. Nature, 7 de septiembre de 1973.
- 4.79. Nature, Sept. 15, 1972.
- 4.80. University of Birmingham.
- 4.81. Nobel Institute für Physiks, Estocolmo.
- 4.82. Oak Ridge Laboratory.
- 4.83. Los Alamos Scientific Labs.
- 4.84. Naval Research Laboratory. Harwell, Oxfordshire.

4.85. Allen; Balfour et al. Nature, 13 de julio de 1963.

4.86. University of California. Berkeley.

## Capítulo 5

5.1-2. Wiley and Sons, Ed. 1949.

5.3. University of Durham.

5.4-5. Instituto Química Física Rocasolano. CSIC, Madrid. 2003.

5.6. N. Ressler. Wayne County General Hospital. Michigan.

5.7. J.R. Hunter. Microbiological Research Establishment, Experimental Station. Porton, Wilts.

5.8. A. Taranta et al. Irvington House. New York.

5.9. Spinco Specialized Instruments. California.

5.10. Carl Zeiss (London) Ltd.

5.11. E. M. de Monasterio. Thames and Hudson.

5.12-14. Walter Clark. John Wiley & sons, 1946.

5.15. Otto Struve. Walter Clark. John Wiley & sons, 1946.

5.16. C. G. Seligman. Ilford Research Labs.

5.17. Los Alamos Scientific Labs.

5.18. J.N. Butters y D. Denby. University of Technology, Loughborough.

5.19. B. S. Hockley y J. N. Butters. Advanced Research Labs. Rolls-Royce Ltd.

5.20-22. J.W.C. Gates. National Physical Lab. Teddington.

5.23. D. Gabor. Research Lab, British Thomson-Houston Co. Ltd, Rugby.

5.24. R & J. Beck. Ltd. Londres.

5.25. Adam Hilger, Ltd. Londres.

5.26. E. v. Angerer. Wissenschaftliche Photographie, 1952.

5.27. M. Geller; M Kurtz.

5.28-30. Adam Hilger, Ltd. Londres.

5.31. Bellingham & Stanley Ltd. Londres.

5.32. Metrovick. Ltd. Londres.

5.33. Philips Electrical. Ltd.

5.34. Ernest Rutherford. The Cavendish Lab, Univ. of Cambridge.

5.35. Lawrence Kersta. Bell Laboratories. New Jersey.

5.36. Nature, Jan 14, 1961, p 118.

5.37. Simon Fraser. Thames and Hudson. 1996.

5.38. Alexander Tsirias. Thames and Hudson. 1996.

5.39. Gancedo, J. R. y Marco, J.F. Instituto Química Física Rocasolano. CSIC. Madrid.

## Capítulo 6

6.1. Biblioteca Nazionale Centrale, Florence.

6.2. Dale P. Cruikshank. 1963.

6.3. Eugène Antoniadi, la planète Mars.

6.4. Nasa Archives. San Francisco.

6.5-7. G. M. Thomas. University of Edinburgh.

6.8. G. Newkirk, L. Lacey. High Altitude Observatory. Colorado.

6.9. Steward Observatory.

- 6.10. White, E. L. C. Nature. 16 de abril de 1932.
- 6.11. Bell Laboratories. New Jersey.
- 6.12. J. D. Kraus y H. C. Ko. Radio Observatory. Ohio State University.
- 6.13. Green Bank, Virginia.
- 6.14. Jordell Bank. University of Manchester.
- 6.15. Arecibo Observatory, Puerto Rico.
- 6.16. J. H. Oort. Sterrewacht te Leiden.
- 6.17. Mullard Observatory. Cambridge.
- 6.18. Royal Greenwich Observatory.
- 6.19. CSIRO Solar Observatory.
- 6.20. Solar Physics. Reidel Publishing Company.
- 6.21. CSIRO Solar Observatory.
- 6.22. American Association for the Advancement of Science.
- 6.23. Nasa. Jet Propulsion Lab.
- 6.24. Royal Radar Establishment.
- 6.25. US Department of the Interior, Geological, Survey.
- 6.26. J.R. Shakeshaft. Cambridge.
- 6.27. Astronomy and Astrophysics.
- 6.28. G.K. Miley et al. Sterrewatch Leiden.
- 6.29. Lick Observatory. University of California.
- 6.30. CSIRO. Radiophysics Lab.
- 6.31-33. Lick Observatory. University of California.
- 6.34. Bibliothèque nationale de France.
- 6.35-36. British Royal Air Force.
- 6.37-38. The Observatories, University of Cambridge. Paris Observatory (Astrophysical Section), Meudon.
- 6.39-41. Physics Department University College, Londres.
- 6.42-43. Culham Lab, U.K. Atomic Energy Authority.
- 6.44. Nasa Archives. San Francisco.
- 6.45-46. Culham Lab, U.K. Atomic Energy Authority.
- 6.47. Royal Aircraft Establishment, Farnborough.
- 6.48. Nature, 25 de enero de 1958.
- 6.49. C.I. Taggart. Meteorological Service of Canada, Ottawa.
- 6.50. Nature, 10 de octubre de 1970
- 6.51. University of Western Australia.
- 6.52. University of Maryland.
- 6.53. Nasa Archives. San Francisco.
- 6.54. School of Physics and Astronomy. University of Minnesota.
- 6.55-56. Lunar-Planetary Research Branch Air Force Cambridge Research Laboratories.
- 6.57-58. Nasa. Jet Propulsion Lab.
- 6.59. L.B. Ronca. Nasa. Jet Propulsion Lab.
- 6.60. RKA y Nasa. Jet Propulsion Lab.
- 6.61-62. RKA.
- 6.63-75. Nasa. San Francisco.
- 6.76. Biblioteca Nacional, Madrid.
- 6.77. The King George III Collection. Science Museum. Londres.
- 6.78. Museo Nacional de Ciencias Naturales, Madrid.

- 6.79. Fundación Cajal, Madrid.
- 6.80. William Hunter. Col. Privada.
- 6.81. Carl Zeiss (London) Ltd.
- 6.82. M. Dimange. La fotografía aplicada a los estudios de anatomía microscópica. 1886.
- 6.83. Gauthier Villars et fils. G. Masson, 1892. París.
- 6.84. Nature.
- 6.85. J. E. Bernard. Nature, 18 de noviembre de 1920.
- 6.86-87. R & J. Beck. Ltd. Londres.
- 6.88. P. Kirkpatrick. Stanford University, California.
- 6.89. V.E. Cosslett y W.C. Nixon. Cavendish Lab, Cambridge.
- 6.90-91. A, A, Blaker. Handbook for Scientific Photography. Focal Press, 1989.
- 6.92. R & J. Beck. Ltd. Londres.
- 6.93. Nature, 31 de agosto de 1957.
- 6.94. C. Baker of Holborn, Ltd.
- 6.95. D. Nye. Nature, 6 de marzo de 1948.
- 6.96. Michael Abbey. Thames and Hudson, 1996.
- 6.97. Pietro Motta. Thames and Hudson, 1996.
- 6.98. Blaker, A, A. Handbook for Scientific Photography. Focal Press, 1989.
- 6.99-100. D.F. Capellaro y S. Narinder Kapany. Optics Technology, Inc.
- 6.101. H.L. Abrams. Stanford University, California.
- 6.102. H.N. Wagner et al. Johns Hopkins University.
- 6.103. Nature, 20 de junio de 1964.
- 6.104. Nature, Feb. 25, 1961.
- 6.105. Measuring & Scientific Equipment, Ltd.
- 6.106-7. Zenith Radio Corp.
- 6.108-12. J.A. Aznárez. Inst. Torres Quevedo. CSIC. Madrid.
- 6.113. Mahlman y Willmarth. Nature, 9 de mayo de 1964.
- 6.114. C.B.A. McCusker. Nature, 27 de septiembre de 1969.
- 6.115-16. Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. Nuclear Physics in Photographs. Clarendon Press, 1947.
- 6.117. Tschiderer, I. Kodak Research Laboratories.1950.
- 6.118. Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. Nuclear Physics in Photographs. Clarendon Press, 1947.
6. 119. Tschiderer, I. Kodak Research Laboratories.1950.
- 6.120-22. Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. Nuclear Physics in Photographs. Clarendon Press, 1947.
- 6.123. R. Berriman. Kodak Research Laboratories. 1948.
- 6.124-26. Blau, M; Rudin, R; y Lindenbaum, S. Columbia University, Nueva York. 1950.
- 6.127. J.H. Webb, J. H. Kodak Research Laboratories. 1948.
- 6.128. Powell. C. F; y Occhialini, G. P. S. Nuclear Physics in Photographs. Clarendon Press, 1947.
- 6.129. J.H. Webb, J. H. Kodak Research Laboratories. 1948.
- 6.130-31. H. Jones y J.E. Eagles. University College of Wales.
- 6.132.J.R. Smith et al. Washington University School of Medicine. St. Louis.
- 6.133. R.G.C. Arridge. Rolls-Royce Ltd. Derby.
- 6.134. J.H.J. Poole y J.W. Bremner. Trinity College, Dublin.



- 6.135.D.A. Young. Atomic Energy Research establishment, Harwell.
- 6.136-37. T. Mamuro et al. Radiation Centre of Osaka Prefecture.
- 6.138. R.G.C. Arridge. Rolls-Royce Ltd. Derby.
- 6.139. Comstock et al. Nuclear Tracks in Solids. Univ. of California Press. 1975.
- 6.140. E. Lifshin. Nasa Archives, San Francisco.
- 6.141. P. Málek et al. Institute for Clinical and Experimental Surgery, Praga.
- 6.142. William A. Edwing. Thames and Hudson, 1996.
- 6.143. Ewing. W. Thames and Hudson, 1996.
- 6.144. A.H. Meleka. y W. Barr. British Iron and Steel Research Association, Londres.
- 6.145. W.V. Mayneord et al. Physics Department, Royal Cancer Hospital, Londres.
- 6.146. J. Chanteur y P. Pellerin. Institut National d'Hygiène, Seine.
- 6.147. M.B. Lion. Oak Ridge National Lab, Oak Ridge.
- 6.148. J.W. Finney et al. Baylor University Medical Center, Dallas.
- 6.149. C.R. Porter. Vallecitos Nuclear Center.
- 6.150. C.M.E. Matthews. MRC Cyclotron Unit, Hammersmith Hospital, Londres.
- 6.151-52. Unicam Instruments (London), Ltd.
- 6.153. R. E. Franklin. Wheatstone Physics Laboratory, King's College, Londres.
- 6.154. R.E. Franklin; y R.G. Gosling, R. G. Wheatstone Physics Laboratory, King's College, Londres.
- 6.155. A. Barrington Brown/ Science Photo Library.
- 6.156. J.C. Kendrew. Nature, 10 de julio de 1954.
- 6.157. M.F. Perutz et al. Cavendish Laboratory, University of Cambridge.
- 6.158-59. J.C. Kendrew. Nature, 20 de septiembre de 1958.
- 6.160. Instituto Química Física Rocasolano. CSIC, Madrid. 2003.
- 6.161-62. Ed. Centro de Estudio Constitucionales. 1988.
6. 163-66. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.
- 6.167. Gauthier Villars et fils. G. Masson, 1892.
- 6.168. Ed. Gauthier- Villars, Paris, 1888.
- 6.169. La Natura, 1980.
- 6.170. Gauthier Villars et fils. G. Masson, 1892.
- 6.171. Ed. Centro de Estudio Constitucionales. 1988.
- 6.172. Blackie and Son Limited, 1923.
- 6.173-74. P.P. Quayle. Bureau of Standards.
- 6.175. P.E. Purves. British Museum. Londres.
- 6.176. Laboratoire Central de l'Armement, París.
- 6.177. D.P.C. Thackeray y J. Brickell.
- 6.178. Mullard Electronic TRResearch Lab, Ltd.6.210. H. Schardin.
- 6.179. D.W. Davies National Physical Lab, Teddington.
- 6.180-81. R.P. Fraser.
- 6.182-84. Frank Früngel.
- 6.185. Aberdeen Proving Ground.
- 6.186. Nevada Proving Ground.
- 6.187. L.H.G. Sterne. Royal Aircraft Establishment, Bedford.
- 6.188-89-90. Frank Früngel.
- 6.191. Nagao, Kyoto University.
- 6.192. G. Porter y M.R. Topp; Davy Faraday research Laboratory, Londres.

- 6.193. Strobokin (Impulsphysik, Hamburg).
- 6.194. V.G. Welsby et al. University of Birmingham.
- 6.195. W. E. Schevil y W.A. Watkins. Wood Hole Oceanographic Institution, Massachusetts.
- 6.196. H. Charnock. National Institute of Oceanography, Wormley.
- 6.197. P.A. Rona. Hudson Labs. Columbia University, Nueva York.
- 6.198. X. Le Pichon et al. Centre Océanologique de Bretagne.
- 6.199. R.P. Fraser y N. Dombrowski, y Butterworths Scientific Publications.
- 6.200. National Physical Laboratory.
- 6.201. R.P. Fraser y N. Dombrowski, y Butterworths Scientific Publications.
- 6.202. R.P. Fraser y N. Dombrowski. Imperial College, Londres.
- 6.203. R.P. Fraser y N. Dombrowski, y Butterworths Scientific Publications.
- 6.204. Frank Früngel.
- 6.205-06. M. Rothschild et al. Nature, 1 de septiembre de 1972.
- 6.207. W.R. Mallory. General Electric Company, Nueva York.
- 6.208. G.E. Ashwell y J.A. Lane; Radio and Space Research Station, Slough.
- 6.209. Atomic Weapons Research Establishment, Foulness.
- 6.210. H. Schardin.
- 6.211-12. Frank Früngel.
- 6.213. F. Latham. R.A.F. Institute of Aviation Medicine, Farnborough.
- 6.214. Medford; Powell; Fletcher. Nature. 6 de octubre de 1962.
- 6.215-16. Morton. Nature, March 2, 1963.
- 6.217. US Department of Interior, Geological Survey.
- 6.218. Zeuthen. DESY.

## **Capítulo 7.**

- 7.1. Julius von Springer Archives. Berlin.
- 7.2. Museo de Louvre, París.
- 7.3. British Museum. Londres.
- 7.4. Museos del Vaticano.
- 7.5. Pinacoteca Ambrosiana. Milán.
- 7.6. Palacios Pontificios, Vaticano.
- 7.7. Helmut Gernsheim Collection.
- 7.8. Metropolitan Museum of Art. Nueva York.
- 7.9. The Leni Riefenstahl Archival Collection.
- 7.10. Photographische Sammlung/SK Stiftung Kultur. Colonia.
- 7.11. The Leni Riefenstahl Archival Collection.
- 7.12. Fundación Universitaria de Navarra.
- 7.13. Hispanic Society of America. Nueva York.